ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ανάλυση της λειτουργίας εργαστηριακού πρωτότυπου μικροδικτύου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαράλαμπος Ι. Αναστόπουλος

Επιβλέπων : Σταύρος Σ. Παπαθανασίου
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2004

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ανάλυση της λειτουργίας εργαστηριακού πρωτότυπου μικροδικτύου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαράλαμπος Ι. Αναστόπουλος

Επιβλέπων : Σταύρος Σ. Παπαθανασίου
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 5η Ιουλίου 2004.

.....	.....	.....
Σταύρος Σ. Παπαθανασίου	Νικόλαος Χατζηαργυρίου	Γεώργιος Κορρές
Λέκτορας Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2004

.....

Χαράλαμπος Ι. Αναστόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Χαράλαμπος Ι. Αναστόπουλος, 2004
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η τεχνική περιγραφή, η ανάλυση των δυνατοτήτων και η καταγραφή της λειτουργίας του πρωτότυπου Μικροδικτύου εναλλασσόμενης τάσης που έχει εγκατασταθεί στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται στην παρούσα του μορφή από φωτοβολταϊκή γεννήτρια ισχύος 1100 Wp, αντιστροφέα DC/AC για τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών στο μικροδίκτυο, συστοιχία συσσωρευτών μολύβδου χωρητικότητας (C_{10}) 250 Ah και αντιστροφέα συσσωρευτών DC/AC αμφίδρομης ροής ισχύος, ο οποίος φορτίζει τους συσσωρευτές αλλά και παρέχει ισχύ στο μικροδίκτυο.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια θεώρηση της παγκόσμιας και ελληνικής ενεργειακής κατάστασης σε σχέση με την εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή. Αναλύονται οι λόγοι που καθιστούν επιτακτική την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αυτές καθώς και οι πιθανές χρήσεις και τα οφέλη από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά. Ταυτόχρονα γίνεται μια σύντομη περιγραφή των διεθνών τάσεων στα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και εξετάζονται τα πλεονεκτήματα της διανεμημένης παραγωγής και πιο συγκεκριμένα των μικροδικτύων, έναντι των συμβατικών συστημάτων.

Το δεύτερο κεφάλαιο ασχολείται με την γενική περιγραφή των βασικών στοιχείων που συνθέτουν ένα μικροδίκτυο, καθώς και των αρχών λειτουργίας των διατάξεών του. Επίσης εξετάζονται ζητήματα που έχουν να κάνουν με την ασφαλή λειτουργία των μικροδικτύων.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή και ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών των διατάξεων του μικροδικτύου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο επιχειρείται μια διεξοδική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του συγκεκριμένου μικροδικτύου καθώς και των δυνατοτήτων του να λειτουργεί τόσο σαν αυτόνομο σύστημα (island operation), όσο και σαν σύστημα διασυνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο (grid-connected operation). Αναλύεται η ηλεκτρική συμπεριφορά κάθε διάταξης και εκτενώς οι δυνατότητες και οι ρυθμίσεις χειρισμού των δύο αντιστροφέων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια καταγραφή της λειτουργίας του μικροδικτύου, από μετρήσεις που πάρθηκαν απ' ευθείας από τα ενδεικτικά όργανα, από παλμογράφο, και μέσω λογισμικού από τις συσκευές που έχουν αυτή τη δυνατότητα. Με την καταγραφή της λειτουργίας και την ανάλυση των αποτελεσμάτων διερευνάται η συμπεριφορά του δικτύου σε μεταβατική και μόνιμη κατάσταση, με φορτία διαφορετικού συντελεστή ισχύος. Η εξέταση αυτή γίνεται τόσο σε αυτόνομη λειτουργία όσο και διασυνδεδεμένη με το κεντρικό δίκτυο. Έμφαση δίνεται στον αντιστροφέα των συσσωρευτών, την απομονωμένη αλλά και παράλληλη λειτουργία του με το κεντρικό δίκτυο χαμηλής τάσης, με βάση τις καμπύλες στατισμού συχνότητας – ενεργού ισχύος και τάσης – αέργου ισχύος.

Λέξεις κλειδιά: μικροδίκτυα, ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, φωτοβολταϊκές γεννήτριες, συσσωρευτές, αντιστροφείς για σύνδεση με το δίκτυο.

Abstract

Scope of the present thesis is the technical description, the analysis and the registration of operation of the prototype laboratory Microgrid system of NTUA. The specific microgrid is installed at the Electric Power Systems laboratory of the Electrical Engineering department. At its present form, the microgrid comprises photovoltaic generators of total power 1100Wp, lead-acid battery energy storage, controllable loads and two fast acting DC/AC power converters. The converters are suitably controlled to permit operation of the system either interconnected to the local low voltage grid or in stand-alone operation, with a seamless transfer from the island mode to grid-tied mode.

The first chapter is an enterprise to the global and the Greek electricity present situation and trends, regarding the implementation of renewable energy sources for generation of electricity. A short examination of the advantages of distributed generation and especially Microgrids is following, instead of conventional electrical networks.

In the second chapter, the general elements of a microgrid are examined (pv modules, power converters and batteries) together with issues of safety of small electrical networks.

The specific elements of the laboratory Microgrid of NTUA are analyzed in the third chapter. In the forth one, the different modes of operation and further abilities of the microgrid inverters are described thoroughly. In its present form, two different modes are available, grid connected or isolated.

Experimental results, long-term and short-term records of operation are presenting in the last chapter. An emphasis is given in transient behavior of the system, the permanent response to loads of variable power factor, and to the study of the P-f and Q-V droop curve characteristics of the battery inverter.

Keywords: microgrids, renewable energy sources, photovoltaic generators, batteries, grid connected inverters.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία είναι αποτέλεσμα πειραματικών δοκιμών στο Μικροδίκτυο του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας αλλά και εκτεταμένης βιβλιογραφικής έρευνας γύρω από το εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα της λειτουργίας μικροδικτύων χαμηλής τάσης με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ιδιαίτερα της ηλιακής ενέργειας). Ελπίζω να είναι και μια ελάχιστη συμβολή στην ενίσχυση και εξάπλωση των ΑΠΕ, ζήτημα πλέον καθοριστικής σημασίας για τη σχέση του ανθρώπου με το περιβάλλον.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Σταύρο Παπαθανασίου, λέκτορα Ε.Μ.Π. για την πολύτιμη βοήθεια, τις υποδείξεις και τις διορθώσεις του κατά τη διάρκεια της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης και τον υποψήφιο διδάκτορα Δ. Γεωργάκη για την παραχώρηση ορισμένων εργαστηριακών πειραμάτων.

Νοιώθοντας ότι κλείνει ένας μικρός κύκλος, θα ήθελα ομοίως να ευχαριστήσω τους γονείς μου, για την συμπαράσταση και την υπομονή τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ **5**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΔΙΚΤΥΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ **13**

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 13
1.2 ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 15
1.3 ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ – ΜΙΑ ΠΡΟΤΑΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ 17
1.4 Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ 19
1.5 ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ 21
1.6 Η ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ 22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΟΥ **25**

2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ 25
2.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ 26
2.2.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο *26*
2.2.2 Άλλες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών *28*
2.2.3 Η αγορά των φωτοβολταϊκών σήμερα *29*
2.2.4 Ενέργεια αποπληρωμής στα φωτοβολταϊκά *29*
2.2.5 Η τοποθέτηση και η λειτουργία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. *31*
2.2.6 Maximum Power Point Tracking (MPPT) *34*
2.2.7 Διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών στοιχείων *37*
2.3 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ 39
2.3.1 Διπολικά τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (IGBT) *39*
2.3.2 Επισκόπηση μετατροπέων DC/DC *40*
2.3.3 Μονοφασικοί αντιστροφείς DC/AC *46*
2.3.4 Ηλεκτρική απομόνωση των μετατροπέων ισχύος *51*
2.3.5 Έλεγχος τάσης και συχνότητας αντιστροφέων *52*
2.3.6 Αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας (Anti-Islanding detection) *57*
Παθητικές μέθοδοι *59*
2.3.6.1 Έλεγχος ορίων τάσης και συχνότητας (OVP/UVP, OFP/UFP) 59
2.3.6.2 Έλεγχος ολίσθησης φάσης (Phase Jump Detection, PJD) 60
2.3.6.3 Έλεγχος αρμονικών τάσης 60
Ενεργητικές μέθοδοι στην πλευρά του αντιστροφέα *61*
2.3.6.4 Μέτρηση της σύνθετης αντίστασης 61
2.3.6.5 Μέτρηση της αντίστασης σε συγκεκριμένη συχνότητα 62
2.3.6.6 Slip mode frequency drift (SMS) 62
2.3.6.7 Frequency bias (Active Frequency Drift) 63
2.3.6.8 Sandia Frequency Drift 65
2.3.6.9 Sandia Voltage Shift (SVS) 65
2.3.6.10 Frequency Jump 66
2.3.6.11 Mains Monitoring With Allocated All-Pole Switching Devices Connected in Series. (MSD) ή (ENS) 66
Μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην πλευρά του δικτύου *67*
2.3.6.12 Εισαγωγή σύνθετης αντίστασης 67
2.3.6.13 Χρήση επικοινωνιών ελέγχου μέσα από τις γραμμές του δικτύου 68
2.3.6.14 Σήμα παραγόμενο από το διακόπτη ζεύξης 69
2.3.6.15 Supervisory control and data acquisition (SCADA) 69

2.3.7 Χρόνος ζωής αντιστροφέων ισχύος *70*
2.4 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ 71
2.4.1 Η τεχνολογία των συσσωρευτών μολύβδου *71*
2.4.2 Φόρτιση του συσσωρευτή *72*
2.4.3 Εκφόρτιση συσσωρευτή *74*
2.4.4 Χωρητικότητα των συσσωρευτών *76*
2.4.5 Παράγοντες που επιδρούν στην φόρτιση – εκφόρτιση των συσσωρευτών και στην διάρκεια ζωής τους *77*
2.4.5.1 Θερμοκρασία 77
2.4.5.2 Βαθμός εκφόρτισης, συστολή-διαστολή μάζας ηλεκτροδίων 78
2.4.5.3 Κύκλοι φόρτισης – εκφόρτισης 79
2.4.6 Άλλα φαινόμενα που επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών *80*
2.4.7 Διάφοροι τύποι συσσωρευτών *82*
2.4.8 Οξειδοαναγωγικοί συσσωρευτές (flow batteries) *84*
2.4.9 Συσσωρευτές για μικροδίκτυα *84*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ 85

3.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ 85
3.2 SUNNY BOY 1100 – ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ (GRID-TIE INVERTER) 89
3.2.1 Τεχνική περιγραφή *90*
3.2.2 Προστασίες του αντιστροφέα *92*
3.2.3 Απόδοση του αντιστροφέα *93*
3.3 SUNNY BOY CONTROL 94
3.4 SUNNY ISLAND. ΑΜΦΙΔΡΟΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ 96
3.4.1 Τεχνική περιγραφή *96*
3.4.2 Επιμέρους στοιχεία του Sunny Island *99*
3.5 ΟΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ 100
3.6 ΆΛΛΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ 101

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ 103

4.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ - ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ 103
4.1.2 Εκτεταμένη ανάλυση των δυνατοτήτων του αντιστροφέα sunny boy. *104*
4.1.3 Δυνατότητες ρύθμισης των στοιχείων ελέγχου για αποσύνδεση από το δίκτυο *105*
4.2 ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ (ISLAND MODE) 107
4.3 ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ SUNNY ISLAND 108
4.3.1 Διαχείριση των συσσωρευτών *109*
4.3.2 Έλεγχος τάσης και συχνότητας από τον αντιστροφέα *114*
4.3.3 Έλεγχος τάσης – συχνότητας από την γεννήτρια (RUN-I) *115*
4.4 ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ (RUN-I Η RUN-U_EXT) 119
4.5 ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ SUNNY ISLAND 124
4.6 ΈΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ 127
4.7 ΤΡΙΦΑΣΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ 128
4.8 ΈΝΤΑΞΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ Η ΑΛΛΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ 128

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ, ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ 131

5.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ 131
5.1.1 Ποιότητα της τάσης στα δίκτυα χαμηλής τάσης *131*
5.1.2 Μεταβατικές καταστάσεις *133*

5.1.3 Σφάλματα *133*
5.1.4 Ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση (EMI) *134*
5.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΟ SUNNY DATA CONTROL 135
5.2.1 Στατιστικά στοιχεία μηνιαίας παραγωγής ενέργειας από το sunny boy (Απρίλιος 2003 – Ιούνιος 2004) *135*
5.2.2 Ετήσια παραγωγή ενέργειας sunny boy *142*
5.2.3 Στοιχεία λειτουργίας sunny boy, Φεβρουάριος 2004 ..... *143*
5.2.4 Στοιχεία λειτουργίας sunny boy, Μάρτιος 2004 ..... *146*
5.3 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ – ΤΥΠΙΚΕΣ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΕΣ 150
5.3.1 Μετρήσεις σύνδεσης – αποσύνδεσης με το δίκτυο *150*
5.3.2 Μετρήσεις με γρήγορη δειγματοληψία *155*
5.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΝΑΛΥΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ METREL PHS50 157
5.4.1 Μεταβατικά φαινόμενα (transients) *157*
5.4.2 Περιοδικές μετρήσεις με διάφορους τύπους φορτίων *162*
5.4.3 Περιοδική μέτρηση σύνδεσης – αποσύνδεσης του δικτύου *166*
5.4.4 Περιοδικές μετρήσεις απομονωμένης λειτουργίας. Μετρήσεις των χαρακτηριστικών καμπύλων στατισμού του αντιστροφέα sunny island. *169*
5.5 ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΤΑΤΙΣΜΟΥ 174
5.5.1 Μετρήσεις χαρακτηριστικών καμπυλών στατισμού σε απομονωμένη λειτουργία, με το πρόγραμμα labview. *174*
5.5.2 Μετρήσεις καμπυλών στατισμού σε διασυνδεδεμένη λειτουργία αλλάζοντας την κανονική συχνότητα και τάση (f_0 και V_0). *177*
5.5.3 Μετρήσεις καμπυλών στατισμού σε απομονωμένη λειτουργία (RUN_U) αλλάζοντας την κανονική συχνότητα και τάση (f_0 και V_0). *181*
5.6 ΠΤΩΣΗ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΚΛΙΣΕΙΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΤΑΤΙΣΜΟΥ. 183
5.6.1 Κλίσεις DroopV=-6%/Qnom, Droopf=-1%Hz/Pnom *187*
5.6.2 Κλίσεις DroopV=+6%/Qnom, Droopf=-1Hz/Pnom *188*
5.6.3 Θετικές Κλίσεις. (DroopV=+6%/Qnom, Droopf=+1Hz/Pnom) *188*
5.6.4 Θετικές κλίσεις (DroopV=+10%/Qnom, Droopf=-1Hz/Pnom) *190*
5.6.5 Διασυνδεδεμένη λειτουργία, αρνητικές κλίσεις (DroopV=-6%/Qnom) *191*
5.6.6 Αρνητική κλίση droopV=-6%/Qnom, δοκιμές επαγωγικών φορτίων σε απομονωμένη λειτουργία *192*
5.6.7 Αρνητική κλίση droopV=-6%/Qnom, δοκιμές μόνο επαγωγικών φορτίων *192*
5.6.8 Αρνητική κλίση droopV=-6%/Qnom, δοκιμές χωρητικών φορτίων *193*
5.7 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΤΩΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ R=1,2Ω, X=0.22Ω 194
5.7.1 Δοκιμές επαγωγικών φορτίων με droopV=-10%/Qnom *194*
5.7.2 Δοκιμές επαγωγικών φορτίων με: droopV=+10%/Qnom *196*
5.7.3 Σύνδεση ωμικών-επαγωγικών φορτίων με: droopV=-10%/Qnom *198*
5.7.4 Σύνδεση ωμικών-επαγωγικών φορτίων με: droopV=+10%/Qnom *199*
5.7.5 Σύνδεση ωμικών-επαγωγικών φορτίων με: droopV=+6%/Qnom *200*
5.7.6 Σύνδεση ωμικών-επαγωγικών φορτίων με:droopV=+6%/Qnom *201*
5.7.7 Δοκιμές ωμικών-επαγωγικών φορτίων με: droopV=-6%/Qnom *202*
5.7.8 Σύνδεση ωμικών-χωρητικών φορτίων με: droopV=+10%/Qnom *203*
5.7.9 Σύνδεση ωμικών-χωρητικών φορτίων με: droopV=-6%/Qnom *204*
5.7.10 Σύνδεση φορτίων με Σ.Ι. cosφ=0.8 επαγωγικό και droopV=-6%/Qnom *205*
5.7.11 Σύνδεση φορτίων με Σ.Ι. cosφ=0.8 επαγωγικό και droopV=+6%/Qnom *206*
5.7.12 Σύνδεση φορτίων με Σ.Ι. cosφ=0.8 χωρητικό και droopV=+6%/Qnom *207*
5.7.13 Σύνδεση φορτίων με Σ.Ι. cosφ=0.8 χωρητικό και droopV=-6%/Qnom *208*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 209

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΑΙ ΑΜΦΙΔΡΟΜΩΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ – ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ 211

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΌΡΙΑ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ 217

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ LABVIEW 221

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 223

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΔΙΚΤΥΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Εισαγωγή

Αξιολογώντας τις ανάγκες του ανθρώπου και των κοινωνιών σήμερα, αναπτυγμένων και αναπτυσσόμενων, αναμφίβολα θα κατατάσσαμε την ενέργεια στις πιο σημαντικές, μαζί με αυτές της διατροφής και της υγείας. Η ηλεκτρική ενέργεια πιο συγκεκριμένα αποκτά ολοένα και μεγαλύτερο μερίδιο στην παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση με ρυθμούς μάλιστα συνεχώς αυξανόμενους. Η παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από 4 τρις KWh όπου ήταν το 1970, έφτασε τις 13 τρις KWh το 2000, ενώ αναμένεται να ξεπεράσει τις 19 τρις KWh το έτος 2015.

Ωστόσο, οι ραγδαίες κλιματικές αλλαγές, τα καταστροφικά καιρικά φαινόμενα, η μόλυνση του περιβάλλοντος, του αέρα, των υδάτων, του εδάφους, δεν απειλούν πλέον μεμονωμένες περιοχές αλλά αρχίζουν να γίνονται ορατές ακόμη και στους κατοίκους των ανεπτυγμένων χωρών. Η άνοδος της θερμοκρασίας παγκοσμίως, οφειλόμενη εν μέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, γίνεται πλέον συνείδηση ότι αποτελεί παγκόσμιο πρόβλημα που απαιτεί μακροχρόνιες στρατηγικές αντιμετώπισης. Και αυτό γιατί έχει αρχίσει να γίνεται πλέον φανερό ότι το οικονομικό και κοινωνικό κόστος που προκαλείται από την άνοδο της θερμοκρασίας και την μόλυνση του περιβάλλοντος είναι πολύ μεγαλύτερο από το κόστος για την αναζήτηση στρατηγικών αντιμετώπισης αυτού του φαινομένου. Ήδη πολλές περιοχές του πλανήτη πλήττονται από φαινόμενα που προκαλούνται από την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ οι πληθυσμοί τους αναγκάζονται να μεταναστεύσουν για αναζήτηση βιώσιμων τόπων.

Η ανησυχία εντείνεται ακόμη περισσότερο καθώς νέες μελέτες έρχονται να συνδέσουν την μείωση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στη γη, με την ύπαρξη στην ατμόσφαιρα των αερίων του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα παρατηρείται μείωση της προσπίπτουσας στη γη ηλιακής ακτινοβολίας της τάξεως του 3% ανά δεκαετία, πράγμα που μεταφράζεται σε συνολική μείωση κατά 15% σε σχέση με τη δεκαετία του ’50. Η αυτομείωση της φωτεινότητας και της θερμότητας των ηλιακών ακτινών ενισχύεται τόσο από την ύπαρξη μεγάλων μαζών αερίων του θερμοκηπίου, όσο και από τις πυκνότερες και μεγαλύτερης διάρκειας νεφώσεις στις διάφορες περιοχές του πλανήτη. Η μεταβολή αυτή ενδέχεται να έχει περαιτέρω αρνητικές επιπτώσεις τόσο στην ίδια την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, όσο και στην διαδικασία της φωτοσύνθεσης, άρα συνολικά στην χλωρίδα και στην αγροτική παραγωγή.

Η παγκόσμια κοινότητα, ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών, προκειμένου να αντιμετωπίσει αυτά τα σοβαρά προβλήματα, θέσπισε ήδη από το 1992 το πρωτόκολλο του Κιότο, μια συμφωνία μεταξύ των κρατών που προσπαθεί να μειώσει την εκπομπή των αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Παράλληλα, η συνείδηση ότι οι συμβατικές πηγές ενέργειας δεν είναι ανεξάντλητες άρχισε να θέτει στην επιστημονική κοινότητα το πρόβλημα της δημιουργίας τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Προς αυτή την κατεύθυνση συνέβαλαν και οι ενεργειακές κρίσεις των δεκαετιών του ’70 και του ’80, οι οποίες έκαναν επιτακτική την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απεξάρτηση των βιομηχανικών χωρών από το πετρέλαιο. Η βασική στροφή από τις συμβατικές πηγές είχε σα μονόδρομο τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δηλαδή την ενέργεια από πηγές που είναι πρακτικά ανεξάντλητες, όπως τον ήλιο, τον αέρα, τις υδατοπτώσεις και τη θερμότητα από τη γη. Το ίδιο αυξήθηκε το ενδιαφέρον για την παραγωγή καυσίμων από εναλλακτικές φυσικές πηγές όπως το φυτικό λάδι και την αιθανόλη (βιοντίζελ), τα απόβλητα και τα σκουπίδια (βιοαέριο), και το υδρογόνο. Ταυτόχρονα άρχισαν να αναζητούνται πρακτικές και τεχνολογίες που θα συμβάλλουν στην εξοικονόμηση της ενέργειας.

Δεν είναι βέβαια μόνο οι πρώτες ύλες των οποίων η καύση συμβάλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου οι μοναδικοί παράγοντες που κλόνισαν τα σημερινά ενεργειακά μοντέλα. Ακόμη μεγαλύτερη είναι η πίεση για την απεξάρτηση από μια μορφή ενέργειας που αποτελεί μέχρι σήμερα βασικό πυλώνα πολλών ενεργειακών συστημάτων. Της πυρηνικής ενέργειας. Το σύνολο σχεδόν των πιο μεγάλων και ισχυρών κρατών (ΗΠΑ, Γαλλία, Γερμανία, Ρωσία, Ιαπωνία) παράγει ένα μεγάλο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας από τα πυρηνικά καύσιμα. Τα ατυχήματα στο Three Mile Island (1979) και στο Τσερνομπίλ (1986) ήταν αυτά που δυνάμωσαν την παγκόσμια ανησυχία για την πυρηνική ενέργεια και έκαναν και τους πιο δύσπιστους να αμφισβητούν τη χρήση της. Οι κυβερνήσεις, ήδη από τη δεκαετία του 1970, άρχισαν να πιέζονται για να σταματήσουν τη δημιουργία νέων πυρηνικών εργοστασίων ηλεκτροπαραγωγής, ενώ σήμερα πλέον, δεδομένη θεωρείται η θέληση των πολιτών τους για κλείσιμο πολλών από τα ήδη υπάρχοντα εργοστάσια.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν για την Ευρώπη, η Γερμανία και η Σουηδία. Στην Γερμανία, με ένα ποσοστό 29% της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας να προέρχεται από πυρηνικά εργοστάσια, 22 GW εγκατεστημένης ισχύος, το 2000 αποφασίσθηκε το σταδιακό κλείσιμο των πυρηνικών εργοστασίων μέχρι το 2020, ενώ στη Σουηδία με το 45% της ηλεκτρικής ενέργειας να προέρχεται από πυρηνικά εργοστάσια, μετά από δημοψήφισμα αποφασίστηκε επίσης το σταδιακό κλείσιμο αυτών.

Παρόμοια είναι η κατάσταση και σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες, οι οποίες προσπαθώντας να καλύψουν την ραγδαία αύξηση στη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας, σχεδιάζουν τη δημιουργία εργοστασίων πυρηνικής ενέργειας (πρόσφατο παράδειγμα η Τουρκία, όπου μεγάλες αντιδράσεις ματαίωσαν την κατασκευή πυρηνικού εργοστασίου). Η κατάσταση βέβαια με την πυρηνική ενέργεια περιπλέκεται ακόμη περισσότερο, καθώς οι υπέρμαχοι αυτής, προβάλλουν ως βασικό πλεονέκτημα το γεγονός ότι τα πυρηνικά εργοστάσια δεν εκπέμπουν ρύπους που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Ενώ λοιπόν το ενεργειακό αυτό τοπίο επιζητά άμεσες λύσεις, η σχετικά πρόσφατη τεχνογνωσία των ανανεώσιμων πηγών, μόνο λίγες δεκαετίες εφαρμογής, δεν επιτρέπει την κάλυψη μεγάλου μέρους των ενεργειακών απαιτήσεων από αυτές. Σήμερα τα ποσοστά διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα ενεργειακά συστήματα κυμαίνονται από 1-30% με συνεχώς αυξητικές βέβαια τάσεις. Εξαίρεση αποτελεί η Ισλανδία όπου πρόσφατα ανακηρύχθηκε το πρώτο κράτος όπου παράγει το 100% της ηλεκτρικής του ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (κυρίως γεωθερμία και υδροηλεκτρικά). Έτσι, παράλληλα με την στροφή στις ανανεώσιμες πηγές, αναζητούνται συνεχώς λύσεις που θα κάνουν τις συμβατικές πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποδοτικότερες και φιλικότερες προς το περιβάλλον. Βασικότερα στοιχεία αυτών των εξελίξεων, αποτελούν τα αποδοτικά συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP), οι γεννήτριες φυσικού αερίου, οι μικροστρόβιλοι και οι κυψέλες καυσίμου.

Δεν είναι ωστόσο μόνο η παραγωγή το πρόβλημα που πρέπει να λυθεί. Εξίσου θεμελιώδες είναι και το ζήτημα της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι αναζητούνται συνεχώς νέες τεχνολογίες που μπορούν να συμβάλλουν στην εξοικονόμηση της ενέργειας και την αύξηση της απόδοσης των ηλεκτρικών συσκευών. Από τους ηλεκτρικούς λαμπτήρες μέχρι τους ηλιακούς συλλέκτες ζεστού νερού, μια σειρά εφαρμογών και τεχνολογιών μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στην μείωση της ηλεκτρικής ζήτησης, γεγονός που εξάλλου είναι πολύ πιο θεμελιώδες από την ίδια την παραγωγή της ενέργειας. Γιατί με άλλα λόγια, δεν έχει και μεγάλη αξία η αναζήτηση νέων πηγών ενέργειας και η κατασκευή συνεχώς περισσότερων σταθμών, για την παραγωγή ενέργειας που σπαταλάται άσκοπα.

	1971	1997	2010	2020	1997-2020*
Total Final Consumption	3 627	5 808	7 525	9 117	2.0
Coal	620	635	693	757	0.8
Oil	1 888	2 823	3 708	4 493	2.0
Gas	608	1 044	1 338	1 606	1.9
Electricity	377	987	1 423	1 846	2.8
Heat	68	232	244	273	0.7
Renewables	66	87	118	142	2.2

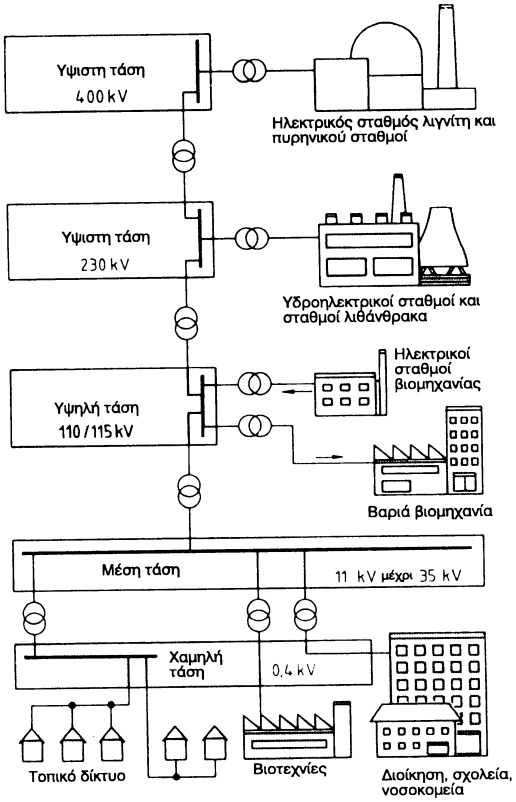
Πίνακας 1.1 **- Παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση ανά τομέα (Mtoe). Πηγή: [31]**

Ενώ όμως για τους κατοίκους των ανεπτυγμένων χωρών έχει μεγάλη σημασία η εξοικονόμηση της ηλεκτρικής ενέργειας, πρακτική που εκτός από επιβεβλημένη είναι και εύκολα υλοποιήσιμη, για κάποιους άλλους ανθρώπους αυτό που προέχει είναι ο εξηλεκτρισμός. Μεγάλα ποσοστά πληθυσμού σε χώρες του τρίτου κόσμου στερούνται ακόμη και σήμερα την πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια, γεγονός που συμβάλει μεταξύ άλλων και στην χαμηλή ποιότητα ζωής. Πέρα από τα οφέλη που έχει ο ηλεκτρισμός για την υγεία, την μόρφωση και την παραγωγικότητα, όσο κι αν ακούγεται παράξενο ο εξηλεκτρισμός μπορεί να συμβάλει και στο θέμα του υπερπληθυσμού. Μελέτες δείχνουν ότι η ύπαρξη ηλεκτρικού μπορεί να συμβάλει κατά ένα ποσοστό 9% στη μείωση των γεννήσεων στις χώρες του τρίτου κόσμου.

1.2 Διανεμημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η πλειοψηφία των ηλεκτρικών δικτύων ανά τον κόσμο δομήθηκε όλες τις προηγούμενες δεκαετίες από την γέννησή τους ακόμη, πάνω στην διαπίστωση ότι το κόστος της παραγόμενης ενέργειας μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους των σταθμών παραγωγής ενέργειας. Η διαπίστωση αυτή ήταν καθοριστικός παράγοντας για την δομή των ηλεκτρικών δικτύων, καθώς βασικότερα κριτήρια για την ηλεκτροπαραγωγή ήταν το κόστος και η απόδοση. Έτσι οι νέοι θερμικοί σταθμοί, είτε αυτοί χρησιμοποιούσαν λιγνίτη ή πετρέλαιο, είτε πυρηνικά καύσιμα, κατασκευάζονταν με όλο και μεγαλύτερη ισχύ ώστε να μειωθεί το κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το κριτήριο αυτό άφηνε σε δεύτερη μοίρα άλλους παράγοντες που σχετίζονταν με το μέγεθος και την τοποθεσία των ηλεκτρικών σταθμών παραγωγής όπως το περιβαλλοντικό κόστος και την εκμετάλλευση της παραγόμενης θερμότητας. Η πρακτική αυτή είχε ως αποτέλεσμα την γιγαντοποίηση των θερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, παράλληλα με την κατασκευή ολοένα και μεγαλύτερων δικτύων μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας με γραμμές υψηλής και πολύ υψηλής τάσης (μέχρι και 700KV).

Μέχρι και σήμερα λοιπόν, ένα τυπικό ηλεκτρικό δίκτυο, βασίζεται στην συγκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας – από λίγους και μεγάλης ισχύος σταθμούς-, την μεταφορά της σε αστικά κέντρα με γραμμές υψηλής τάσης και στη συνέχεια τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας με γραμμές μέσης και χαμηλής τάσης. Το μοντέλο αυτό άρχισε να αμφισβητείται σταδιακά από τη δεκαετία του 1980, καθώς νέα δεδομένα έπρεπε να ληφθούν υπ' όψη.



Εικόνα 1.1 **- Τυπικό παράδειγμα ηλεκτρικού δικτύου με μονόδρομη ροή ισχύος.**

Μέχρι τώρα βασικότερος παράγοντας καθορισμού της περιοχής εγκατάστασης ενός μεγάλου εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ήταν αφενός η εύκολη μεταφορά της πρώτης ύλης που θα χρησιμοποιεί και κατά δεύτερο η εύκολη απόρριψη της παραγόμενης θερμότητας. Η πρακτική αυτή θεωρείται όχι μόνο σπάταλη, αλλά και επιζήμια για το περιβάλλον. Αυτό διότι έτσι κι αλλιώς η απόδοση των θερμικών εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρή (το πολύ 30% έως 35% σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου), καθώς το μεγαλύτερο μέρος της πρωτογενούς ενέργειας (1/2 έως και 3/4 αυτής) χάνεται υπό μορφή θερμότητας (ζεστό νερό ή υδρατμός). Οι μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, έχουν το πλεονέκτημα να διοχετεύουν την εκλυόμενη θερμότητα για βιομηχανική χρήση ή οικιακή θέρμανση, αξιοποιώντας έτσι πλήρως την καύσιμη ύλη. Η πρακτική αυτή θεωρείται πολύ φιλικότερη για το περιβάλλον, αφενός γιατί η παραγόμενη θερμότητα δεν πηγαίνει χαμένη, αλλά χρησιμοποιείται για θέρμανση *–θέρμανση η οποία υπό άλλες συνθήκες θα απαιτούσε κατανάλωση καυσίμων για να παραχθεί* – και αφετέρου διότι αποφεύγεται η έκλυση θερμού νερού σε ποτάμια ή θάλασσες επηρεάζοντας έτσι αρνητικά τα οικοσυστήματα.

Αντίθετα όμως με τον ηλεκτρισμό, η θερμότητα δεν μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις, πράγμα που καθιστά την συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας δυνατή μόνο κοντά στο σημείο παραγωγής.

Μια λύση στο ζήτημα αυτό έρχεται να δώσει η διανεμημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Distributed Generation). Αντίθετα από την συγκεντρωμένη παραγωγή από λίγους και γιγάντιους θερμικούς σταθμούς, ικανούς να τροφοδοτήσουν με ζεστό νερό μόνο την περιοχή που βρίσκονται, η διανεμημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες συμπαραγωγής θα ήταν ικανή να τροφοδοτήσει τόσο με ηλεκτρισμό όσο και με ζεστό νερό για θέρμανση πολύ μεγαλύτερο ποσοστό πληθυσμού καθώς και βιομηχανικές μονάδες.

Παράλληλα με την παροχή ζεστού νερού εκεί όπου απαιτείται, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κοντά στο σημείο κατανάλωσης μειώνει σημαντικά τις απώλειες που συνεπάγεται η μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις.

Συνακόλουθη είναι και η αποσυμφόρηση των ηλεκτρικών γραμμών μεταφοράς και διανομής, των μετασχηματιστών καθώς και η επιβράδυνση μεγάλων επενδύσεων στα ηλεκτρικά δίκτυα (προσθήκη νέου εξοπλισμού για κάλυψη νέων φορτίων) αφού η ζήτηση καλύπτεται εν μέρει από την τοπικά παραγόμενη ενέργεια. Το οικονομικό κόστος από την αποσυμφόρηση αυτή μπορεί να είναι πολύ σημαντικό, καθώς μειώνονται σημαντικά οι αστοχίες των διατάξεων διανομής λόγω υπερφόρτισης, άρα και η συντήρηση του δικτύου. Αξίζει να σκεφτεί κανείς το αυξημένο ποσοστό βλαβών στις διατάξεις των δικτύων διανομής μέσης και χαμηλής τάσης σε περιόδους μεγάλης ζήτησης, π.χ. το καλοκαίρι στα αστικά κέντρα.

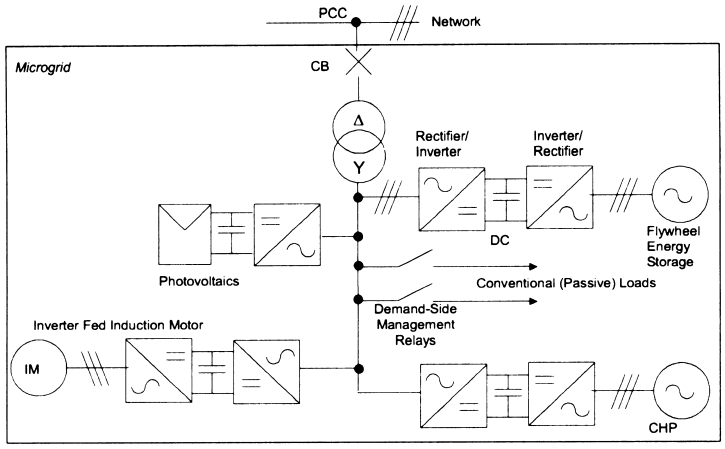
1.3 Μικροδίκτυα – Μια πρόταση για το μέλλον

Προσπαθώντας να καλύψουν τα ζητήματα που έχουν να κάνουν με την αποδοτική λειτουργία γεννητριών συμβατικών καυσίμων, την χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την μείωση των απωλειών μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με την αύξηση της αξιοπιστίας, τα μικροδίκτυα αποτελούν ένα μοντέλο έρευνας που μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά στην εξέλιξη των ενεργειακών συστημάτων.

Ένα τυπικό μικροδίκτυο αποτελείται από διάφορες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συνολικής ισχύος μέχρι λίγα MW. Ο σχεδιασμός του μικροδικτύου είναι ανεξάρτητος από το κεντρικό δίκτυο, ωστόσο μπορεί να υπάρχει διασύνδεση με αυτό, για ανταλλαγή ενέργειας. Τυπικές πηγές ενέργειας ενός μικροδικτύου είναι οι γεννήτριες ντίζελ ή φυσικού αερίου, συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού (γεννήτριες, μικροστρόβιλοι), οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά, οι κυψέλες καυσίμου, οι γεωθερμικοί και οι ηλιοθερμικοί σταθμοί, τα μικρά υδροηλεκτρικά, οι μονάδες που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη βιομάζα, βιοντίζελ ή οποιαδήποτε άλλη πηγή ενέργειας. Ένα μικροδίκτυο μπορεί να εγκατασταθεί εκεί όπου υπάρχει διαθέσιμη μια από τις παραπάνω φυσικές πηγές ενέργειας και να καλύπτει τις καταναλώσεις της περιοχής που εγκαθίσταται. Η κλίμακα του μικροδικτύου ποικίλει, από μια οικία που χρησιμοποιεί ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών και γεννήτριας ντίζελ ή βιοκαυσίμων, ένα νοσοκομείο που χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού, μέχρι και μια πόλη που τροφοδοτείται από σταθμούς βιομάζας, γεννήτριες ντίζελ και αιολικά πάρκα.

Μια συνδυασμένη χρήση των νέων τεχνολογιών συμπαραγωγής και ανανεώσιμων πηγών, θα μπορούσε ίσως να κάνει την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στο μικροδίκτυο ανταγωνιστική αυτής των κεντρικών δικτύων.

Η αξιόπιστη λειτουργία ενός μικροδικτύου, συνεπάγεται εκτός από την κάλυψη των απαιτήσεων ενεργού και αέργου ισχύος, και τη συνεχή ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας αυτού. Παράλληλα θα πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις διατάξεις προστασίας από σφάλματα, βραχυκυκλώματα ή διαρροές.



***Εικόνα 1.2* - Τυπικό παράδειγμα μικροδικτύου, με φωτοβολταϊκά, γεννήτρια συμπαραγωγής ηλεκτρισμού – θερμότητας, κινητήρα επαγωγής και σφόνδυλο υψηλής αδράνειας για την αποθήκευση της ενέργειας, όλα ελεγχόμενα και με ηλεκτρονικούς αντιστροφείς ισχύος. Το μικροδίκτυο συνδέεται με το κεντρικό δίκτυο μέσω μετασχηματιστή.**

Ένα μικροδίκτυο μπορεί να έχει δυνατότητα διασύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Σε μια τέτοια παραλληλισμένη λειτουργία είναι δυνατή η ανταλλαγή ενέργειας. Παροχή πλεονάζουσας ενέργειας σ' αυτό, ή απορρόφηση ενέργειας όταν οι μονάδες του μικροδικτύου δεν επαρκούν να καλύψουν τη ζήτηση. Ακόμη σε περίπτωση μόνιμα διασυνδεδεμένης λειτουργίας είναι δυνατή η αξιόπιστη τροφοδότηση του μικροδικτύου από τις δικές του μονάδες σε περίπτωση κατάρρευσης του κεντρικού δικτύου.

Δεδομένης της μικρής ισχύος των περισσότερων μονάδων ενός μικροδικτύου, η παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι προτιμότερο να γίνεται στην χαμηλή τάση καθώς δεν απαιτείται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Το μέγεθος δηλαδή των μονάδων παραγωγής είναι ουσιαστικά αυτό που καθορίζει την στάθμη λειτουργίας. Το μέγεθός του συνολικότερα, μονάδων παραγωγής και φορτίων, καθορίζει εξάλλου και τον τρόπο διασύνδεσής του με άλλα μικροδίκτυα ή με το κεντρικό δίκτυο, στην μέση ή στην χαμηλή τάση. Προφανώς μεγάλη ισχύς απαιτεί διασύνδεση στη μέση τάση.

Πρέπει να τονιστεί ότι σε περιπτώσεις παραλληλισμένης λειτουργίας με το κεντρικό δίκτυο, αυτό που πρωτίστως επιδιώκεται είναι να μην προκαλεί το μικροδίκτυο προβλήματα. Η ποιότητα της τάσης πρέπει να ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του δικτύου, η απορροφούμενη ενέργεια να μην ξεπερνά τις απαιτήσεις ενός τυπικού καταναλωτή.

Σε ένα δεύτερο στάδιο, ένα μικροδίκτυο μπορεί να συμπεριφερθεί σαν ένας «καλός γείτονας» του κεντρικού δικτύου. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να συμβαίνει αν το μικροδίκτυο ρυθμιζόταν ώστε να μπορεί να υποστηρίξει το κεντρικό δίκτυο, π.χ. να παρέχει ή να απορροφά ενεργό ή άεργο ισχύ όταν απαιτείται, ακόμη και σε μικρά χρονικά διαστήματα. Στην δεύτερη αυτή περίπτωση απαιτείται προφανώς και μια μορφή επικοινωνίας μεταξύ των κέντρων ελέγχου μικροδικτύου και κεντρικού δικτύου.

Και πάλι νέες τεχνολογίες υπόσχονται πολλά στην διαχείριση των μεταβατικών φαινομένων. Για την κάλυψη υψηλών αιχμών ζήτησης (π.χ. εκκίνηση μεγάλων κινητήρων, ψυγείων) και την αποθήκευση περισσευούμενης ενέργειας, ένα μικροδίκτυο, ιδιαίτερα όταν βρίσκεται σε απομονωμένη λειτουργία, μπορεί να χρησιμοποιεί ενέργεια που αποθηκεύεται σε υπερ-πυκνωτές, υπεραγώγιμα πηνία, μηχανές υψηλής στρεφόμενης αδράνειας (flywheels), συσσωρευτές, ή με τη μορφή δυναμικής ενέργειας μέσω συμπιεστών αέρα ή αντλησιοταμιευτικών συστημάτων. Η τελευταία δε τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές όπου αιολικά ή ηλιακά πάρκα βρίσκονται κοντά σε θάλασσα ή λίμνη, οπότε και α-

ποθηκεύουν την περισσευούμενη ενέργεια που παράγουν, αντλώντας νερό σε ταμιευτήρες υψηλότερης στάθμης. Στη συνέχεια όταν χρειάζεται ενέργεια οι αντλητικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται ως γεννήτριες, παρέχοντας ισχύ στο μικροδίκτυο.

Πρέπει να τονιστεί ότι ένας πολύπλοκος έλεγχος ενός τέτοιου συστήματος με την παρούσα διαθέσιμη τεχνολογία απαιτεί την χρησιμοποίηση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, για τη διασύνδεση των περισσότερων πηγών ενέργειας του μικροδικτύου με τους ζυγούς. Είτε η παραγόμενη ισχύς είναι διαρκώς μεταβαλλόμενη όπως στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών, είτε ελεγχόμενη όπως των υδροηλεκτρικών σταθμών και των ντιζελογεννητριών, η διοχέτευση αυτής μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων κάνει εφικτό τον έλεγχο των πιο σημαντικών μεγεθών αυτής, δηλαδή της τάσης και της συχνότητας, μέσω της ροής ενεργού και αέργου ισχύος. Το βασικότερο στοιχείο ενός μικροδικτύου είναι συνήθως ένας ηλεκτρονικός αντιστροφέας ισχύος, ο οποίος ελέγχει και το ισοζύγιο ισχύος στο μικροδίκτυο. Αυτό μπορεί να γίνεται είτε με την οδήγηση μιας ελεγχόμενης γεννήτριας, είτε με την διαχείριση συσσωρευτών ή μικροστροβίλων, είτε με τον έλεγχο των ηλεκτρονικών ισχύος των άλλων μικρομονάδων παραγωγής ενέργειας.

1.4 Η ελληνική πραγματικότητα

Οι υποχρεώσεις της Ελλάδας που απορρέουν από τη δέσμευσή της στα πλαίσια της συμφωνίας για τη μείωση των εκπομπών των αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπως αυτά διασαφηνίστηκαν στο πρωτόκολλο του Κιότο προβλέπουν συγκράτηση του ρυθμού αύξησης κατά το έτος του 2010 του διοξειδίου του άνθρακα κατά 25% σε σχέση με το έτος βάση 1990. Σ' αυτήν την κατεύθυνση κινείται και η οδηγία 2001/77 της Ευρωπαϊκής Ένωσης *«Για την προαγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές στην εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας»* η οποία προβλέπει ενδεικτικό στόχο κάλυψης από ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές ίσο με 20,1% της ακαθάριστης κατανάλωσης ενέργειας κατά το έτος 2010 για την Ελλάδα.

Δεδομένου ότι κατά το έτος 2001 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ κυμαινόταν σε ποσοστό 8,4% της συνολικής κατανάλωσης (6,8% από μεγάλα υδροηλεκτρικά και 1,6% από μικρά υδροηλεκτρικά, ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά και βιομάζα), είναι εμφανής η ανάγκη για περαιτέρω διείσδυση μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του Υπουργείου Ανάπτυξης και της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας θα συνεχίσει να αυξάνεται με μέσο όρο 4% για το ηπειρωτικό σύστημα και 5,5% για τα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα μέχρι το 2005 και μετά να κινηθεί ενιαία σε ποσοστό αύξησης 3,6 για όλη τη χώρα. Αυτό συνεπάγεται συνεχή επέκταση των εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πράγμα που αντιτίθεται στις δεσμεύσεις της Ελλάδας για συγκράτηση των αεριών του θερμοκηπίου.

Να σημειωθεί ότι ήδη η Ελλάδα κινείται εκτός των προβλεπόμενων ορίων, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να αναζητηθούν στρατηγικές συγκράτησης των αερίων του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα τη δεκαετία του 1990 καταγράφεται μια αύξηση των ρύπων των αερίων του θερμοκηπίου 23,4%, και σύμφωνα με τους ρυθμούς αύξησης αυτών, η Ελλάδα το 2010 θα έχει αυξήσει τους ρύπους της κατά 35,8%. Το ποσοστό αυτό ξεπερνά τα όρια που έχουν θεσπισθεί από το πρωτόκολλο του Κιότο κατά 10,8%. Να σημειωθεί ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα –του βασικότερου των αερίων του θερμοκηπίου- προκαλούνται στην Ελλάδα κατά 77,9% από την καύση του λιγνίτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα παραπάνω στοιχεία είναι αρκετά για να δικαιολογήσουν την σταδιακή εγκατάλειψη νέων σχεδίων κατασκευής μεγάλων μονάδων παραγωγής ενέργειας από λιγνίτη και να σημάνουν τη στροφή προς την διανεμημένη παραγωγή.

Η κατασκευή σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο, μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας καθώς και η κατασκευή μικρών φραγμάτων και αιολικών πάρκων είναι από τα μέτρα που κινούνται προς την κατεύθυνση μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου, ταυτόχρονα με την προσπάθεια κάλυψης της συνεχώς αυξημένης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Μια σειρά παραγόντων καθιστούν ευνοϊκότερη τη δημιουργία διεσπαρμένων μονάδων και μικροδικτύων στον ελληνικό χώρο. Πολλοί από αυτούς έχουν να κάνουν με τη μορφολογία της Ελλάδας.

Με δεδομένο ότι το 60% της ενέργειας που δαπανάται για οικιακή χρήση - καθώς και το 50% της ενέργειας για εμπορική χρήση- καταναλώνεται για την θέρμανση των κτιρίων, είναι εμφανής η σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας που θα προέκυπτε με την εγκατάσταση περισσότερων μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας κοντά σε αστικά κέντρα ή επαρχιακές πόλεις. Σήμερα, σε λίγες μόνο πόλεις που βρίσκονται κοντά σε θερμικούς σταθμούς στη βόρεια Ελλάδα έχουν εγκατασταθεί δίκτυα τηλεθέρμανσης, ενώ δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις των σταθμών που απάγουν την θερμότητα σε θάλασσες ή ποτάμια, επηρεάζοντας αρνητικά τα τοπικά οικοσυστήματα (ευτροφισμός).

Για το ηπειρωτικό σύστημα μια στροφή στη διανεμημένη παραγωγή θα εξομάλυνε περισσότερο την ανισορροπία μεταξύ του τόπου παραγωγής και κατανάλωσης. Ενώ δηλαδή το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται στη βόρεια Ελλάδα, το ένα τρίτο της κατανάλωσης γίνεται στην Αττική πράγμα που συμβάλλει στις μεγάλες απώλειες κατά την μεταφορά της ενέργειας μέσω γραμμών υψηλής τάσης. Για το ελληνικό σύστημα οι απώλειες αυτές ανέρχονται στο 12% της παραγόμενης ενέργειας, σημαντικό μέρος των οποίων θα μπορούσε να αποφευχθεί αν μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας παράγονταν πιο κοντά στους τόπους κατανάλωσης. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κοντά στον τόπο κατανάλωσής της, θα μπορούσε επιπρόσθετα να συμβάλει στο μείζον θέμα της εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς θα ευαισθητοποιούσε περισσότερο τους καταναλωτές.

Ο δεύτερος βασικός λόγος έχει να κάνει με το νησιωτικό χαρακτήρα της Ελλάδας, ο οποίος και καθιστά αναπόφευκτη την ύπαρξη πολλών μικρών αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων, μη διασυνδεδεμένων φυσικά με το ηπειρωτικό δίκτυο. Η παραγωγή ενέργειας στα νησιά γίνεται ως επί το πλείστο από ντίζελ (και σε ελάχιστα και από μαζούτ). Η παραγωγή αυτή αντιστοιχεί στο 7,1% της εγχώριας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τόσο το ντίζελ όσο και το αργό πετρέλαιο που χρησιμοποιούνται εισάγονται. Δεδομένου του μεγάλου ρυθμού αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας 5,5% για το μη διασυνδεδεμένο σύστημα, είναι αυτονόητη η ωφέλεια που θα προέκυπτε για την ενεργειακή απεξάρτηση της Ελλάδας από τη συμβολή των ανανεώσιμων πηγών στο μη διασυνδεδεμένο σύστημα, στο βαθμό που αυτό είναι τεχνικά επιτρεπτό.

Δεδομένη είναι εξάλλου η μειωμένη αξιοπιστία των μικρών συστημάτων που αποτελούνται μόνο από ντιζελογεννήτριες, με συνεχείς βυθίσεις της τάσης, μεταβολή της συχνότητας και διακοπές. Η δημιουργία μικροδικτύων με διεσπαρμένες μονάδες ανανεώσιμων πηγών σε συνδυασμό με μικροστροβίλους ή σφονδύλους υψηλής αδράνειας μπορεί να αποδειχθεί πιο οικονομική λύση απ' ότι με τη διασύνδεση μιας περιοχής με το υπάρχον δίκτυο.

Ωστόσο, πολλά είναι τα προβλήματα που συνδέονται με την διείσδυση των ΑΠΕ και άλλων μικρομονάδων στο εγχώριο σύστημα παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Βασικός παράγοντας είναι η διαφορετική φιλοσοφία πάνω στην οποία χτίστηκε το ελληνικό σύστημα. Ένα σύστημα που μέχρι σήμερα βασίζεται πάνω στην συγκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μεγάλους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς και ακτινωτή μεταφορά προς τις καταναλώσεις με μονόδρομη ροή ισχύος, συναντά μια σειρά εμποδίων που έχουν να κάνουν με τον έλεγχο, την ευστάθεια, τις προστασίες και την αξιοπιστία στην μετατροπή του σε ένα δίκτυο διανεμημένης παραγωγής.

Επιπλέον απαιτούνται σημαντικές παρεμβάσεις στο δίκτυο διανομής και ελέγχου, ώστε να μπορούν να διαχειριστούν την διανεμημένη παραγωγή τόσο από τις μονάδες ανανεώσιμων πηγών όσο και από τις άλλες μικρές μονάδες. Εκτεταμένη μελέτη για παράδειγμα θα απαιτούσε και η συμβολή των μικροδικτύων που διασυνδέονται με το κεντρικό δίκτυο μέσης ή χαμηλής τάσης στη στάθμη βραχυκύκλωσης αυτού, καθώς και η συμπεριφορά τους σε σφάλματα ή γενικές διακοπές.

1.5 Διανεμημένη παραγωγή και ηλιακή ενέργεια

Όλοι οι προαναφερθέντες λόγοι, όπως και παράγοντες που έχουν να κάνουν με την προσπάθεια των κρατών για ενεργειακή απεξάρτηση από το πετρέλαιο οδήγησαν πολλές κυβερνήσεις όχι μόνο να προωθήσουν αλλά και να ενισχύσουν οικονομικά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Πρωτοπόρα σ' αυτή την προσπάθεια ενίσχυσης των ΑΠΕ, και ιδιαίτερα της ηλιακής ενέργειας, ήταν και είναι κράτη τεχνολογικά προηγμένα με σημαντική βιομηχανία υψηλής τεχνολογίας.

Για παράδειγμα τεχνολογικά αναπτυγμένες χώρες όπως η Ιαπωνία, η Γερμανία, οι Η.Π.Α. κατέχουν μέχρι σήμερα τα υψηλότερα ποσοστά παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικά εργοστάσια. Η έντονη πίεση των πολιτών τους για απεξάρτηση από την πυρηνική ενέργεια και η δεδομένη ανάγκη όλων των οικονομιών για οικονομική απεξάρτηση από το πετρέλαιο τα οδήγησε σήμερα να κατέχουν και ένα από τα μεγαλύτερα ποσοστά τόσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όσο και το μεγαλύτερο μερίδιο από την βιομηχανική παραγωγή φωτοβολταϊκών, ανεμογεννητριών και ηλεκτρονικών ισχύος που τα συνοδεύουν.

Μέχρι τη δεκαετία του '90, τα φωτοβολταϊκά έβρισκαν εφαρμογή κυρίως σε περιπτώσεις όπου απαιτούνταν ηλεκτρική ενέργεια αλλά δεν υπήρχε δυνατότητα τροφοδότησης από το βασικό ηλεκτρικό δίκτυο κάθε περιοχής. Τυπικές περιπτώσεις ήταν και εξακολουθούν να είναι μέχρι σήμερα η τροφοδότηση φάρων και κεραιών τηλεφωνίας και ραδιοσταθμών, απομονωμένα σπίτια και οικισμοί, αντλίες σε γεωργικές καλλιέργειες και διάφορα άλλα μικροσυστήματα. Τη προηγούμενη δεκαετία ωστόσο, μαζί με το ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που ανατροφοδοτήθηκε από την παγκόσμια ανησυχία για την μόλυνση του περιβάλλοντος και τις κλιματικές αλλαγές, άρχισαν να εξελίσσονται τεχνολογίες για μια πιο ευρεία εφαρμογή των φωτοβολταϊκών πέρα από τις καθιερωμένες χρήσεις τους.

Μια σειρά από χώρες, συμπεριλαμβανομένων των περισσοτέρων ευρωπαϊκών, θέσπισαν γενναία κίνητρα ώστε να ενισχυθεί η διανεμημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ενέργεια και άλλες ανανεώσιμες πηγές, είτε από ιδιώτες είτε από μεγάλους παραγωγούς. Τα σημαντικότερα από αυτά περιλαμβάνουν είτε επιδότηση για την αγορά του εξοπλισμού της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, είτε επιδότηση της ηλιακής κιλοβατώρας, δηλαδή μια υποχρέωση των διαχειριστών του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου να αγοράζουν την ενέργεια που παράγεται από φωτοβολταϊκά από τους ιδιώτες, σε τιμή πολλή μεγαλύτερη από αυτή που κοστολογούν την προς πώληση ηλεκτρική ενέργεια.

Ως παραδείγματα μπορούν να αναφερθούν το πρόγραμμα των 100.000 ηλιακών στεγών που εκπονήθηκε από τη γερμανική κυβέρνηση, το πρόγραμμα 75.000 στέγες της ιαπωνικής κυβέρνησης, το πρόγραμμα City of the Sun από την ολλανδική κυβέρνηση και άλλα παρόμοια, τα οποία εκτόξευσαν την εγκατάσταση των διασυνδεδεμένων με το δίκτυο φωτοβολταϊκών συστημάτων μέσα σε λίγα χρόνια.

Στον ευρωπαϊκό χώρο, η Γερμανία ήταν από τις πρώτες χώρες που όχι μόνο είδε θετικά την διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό της σύστημα αλλά και βοήθησε ποικιλοτρόπως την προαγωγή της τεχνολογίας και της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών. Αυτό βέβαια δεν προέκυψε μόνο λόγω της τεχνογνωσίας που διαθέτει η γερμανική βιομηχανία,

αλλά και ως απόρροια της πίεσης των πολιτών για στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ας μην ξεχνάμε ότι η Γερμανία ήταν από τα λίγα κράτη που παρήγαγαν και παράγουν ακόμη (με τάση να μειώνεται) ηλεκτρική ενέργεια από πυρηνικά εργοστάσια, πράγμα που είχε προκαλέσει πολλές αντιδράσεις στο εσωτερικό της για το κλείσιμό τους.

Αποτέλεσμα αυτής της πολιτικής ήταν το 1991 να θεσπιστεί ένα πρωτοποριακό πρόγραμμα 1.000 ηλιακών στεγών το οποίο επιδοτούσε την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων από ιδιώτες στις κατοικίες τους, συνδέοντας το σύστημα με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Μέχρι το 1995 εγκαταστάθηκαν 2250 συστήματα με μια μέση ισχύ 2,6 KW το καθένα. Αντίστοιχα προγράμματα εκπονήθηκαν από 40 πόλεις της Γερμανίας από το 1995 έως και το 1999. Το 1990 θεσπίστηκε ένα ακόμη πιο θαρραλέο πρόγραμμα για την εγκατάσταση 100.000 ηλιακών στεγών, ο οποίος βελτιώθηκε το 2000 λόγω των κριτικών που δέχθηκε για έλλειψη επαρκών κινήτρων. Έτσι ο γερμανικός νόμος EEG του 2000, αποτελεί μέχρι σήμερα υπόδειγμα ενίσχυσης των ανανεώσιμων πηγών, επιδοτώντας γενναία τον ηλεκτρισμό που παράγεται από αυτές, όπου για τα φωτοβολταϊκά συστήματα ανέρχεται σε 0,506 €/KWh. Και όλα αυτά με το δεδομένο ότι η Γερμανία έχει σχετικά μικρό ηλιακό δυναμικό, λόγω της γεωγραφικής της θέσης.

Η εκτεταμένη αυτή εφαρμογή των διασυνδεδεμένων συστημάτων οδήγησε σε μια ώριμη βιομηχανία φωτοβολταϊκών, αλλά κυρίως ηλεκτρονικών ισχύος που τα συνοδεύουν. Και αυτό γιατί χρησιμοποιήθηκε η εμπειρία της σημαντικής αυτής διείσδυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο, η οποία βέβαια συνοδεύεται πάντοτε από προσεκτική παρακολούθηση των αρμόδιων φορέων. Η γερμανική εταιρία SMA αναφέρει ότι έχουν εγκατασταθεί πάνω από 300 MW αντιστροφέων sunny boy για την διασύνδεση φ/β με το δίκτυο παγκόσμια.

Όχι όμως μόνο για τις αναπτυγμένες, αλλά και για τις αναπτυσσόμενες χώρες η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών γεννητριών με τη δημιουργία μικροδικτύων μπορεί να αποδειχθεί πολύτιμη σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει καθόλου ηλεκτρικό ρεύμα ή αν υπάρχει γίνεται με πολύ μεγάλο οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος. Για απομονωμένες ορεινές περιοχές, μικρούς παράκτιους οικισμούς, χωριά μέσα σε δάση και δύσβατους τόπους, και άλλες περιπτώσεις όπου δεν υφίστανται καθόλου ηλεκτρικά δίκτυα, η αποκεντρωμένη παραγωγή από ηλιακή ενέργεια θα μπορούσε να αποδειχθεί η πιο συμφέρουσα και φιλική προς το περιβάλλον λύση.

Οι στρατηγικές που υλοποιούνται, παράλληλα με τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών γεννητριών –της εύκολης εγκατάστασης, της ελάχιστης συντήρησης και της αθόρυβης λειτουργίας- τις καθιστούν ως βασική πηγή ενέργειας κάθε μελλοντικού μικροδικτύου. Αν και λόγω του μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες δεν μπορούν να λειτουργήσουν ως ρυθμιστές της ισχύος, η μεγάλη προσφορά τους σε ένα αποκεντρωμένο μικροδίκτυο είναι να μειώνουν την συνολική ισχύ που κυκλοφορεί, παρέχοντας μέρος της ενέργειας εκεί όπου ακριβώς ζητείται σε κατοικίες και άλλα κτίρια, ιδιαιτέρως τις ημερήσιες ώρες αιχμής. Η πρακτική αυτή αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία στα δίκτυα χαμηλής τάσης, με τα οποία εκ των πραγμάτων θα δομείται ένα μικροδίκτυο. Μεταφορά μεγάλης ισχύος σε δίκτυα χαμηλής τάσης, συνεπάγεται και αυξημένες ωμικές απώλειες στις γραμμές, πέρα από το γεγονός ότι η ικανότητα μεταφοράς ισχύος είναι περιορισμένη σ' αυτά.

1.6 Η παραγωγή ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα

Σε αναντιστοιχία με τις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες, οι οποίες όπως προαναφέρθηκε καταβάλλουν μια μεγάλη προσπάθεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, στην Ελλάδα αυτή παραμένει περιθωριακή. Μέχρι σήμερα η εγκατάσταση

φωτοβολταϊκών συστημάτων αφορά ως επί το πλείστον σε περιπτώσεις στις οποίες είναι αδύνατη η τροφοδότηση από το κεντρικό δίκτυο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων είναι οι πολλές περιπτώσεις αυθαιρέτων κτισμάτων που δεν δικαιούνται ρεύμα από το κεντρικό δίκτυο, η τροφοδότηση φάρων, κεραιών κινητής τηλεφωνίας και ραδιοσταθμών, και οικισμοί οι οποίοι είναι απομονωμένοι από το κεντρικό δίκτυο όπως μικρά νησιά.

Μερίδιο αγοράς φωτοβολταϊκών εφαρμογών στην Ελλάδα (έτος 2002)		
Τύποι φωτοβολταϊκών εφαρμογών	Εγκατεστημένη ισχύς KW	Μερίδιο αγοράς %
Διασυνδεδεμένα στο δίκτυο	1.039	44
Αυτόνομα συστήματα	1.326	56
ΣΥΝΟΛΟ	**2.365**	**100**

Πίνακας 1.2 **– Μερίδιο αγοράς φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα. Πηγή: [17]**

Προκαλεί μεγάλη αντίφαση το γεγονός ότι ενώ το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας είναι σχεδόν διπλάσιο από των περισσοτέρων βόρειων ευρωπαϊκών χωρών, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο, είναι η μικρότερη από κάθε άλλη ευρωπαϊκή χώρα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Γερμανία στην οποία το μέσο ηλιακό δυναμικό είναι 2,8 KWh/m^2/ημέρα έχει σήμερα εγκατεστημένα 277,3 MW ηλιακών συστοιχιών. Στην Ελλάδα με μέσο δυναμικό 5 KWh/m^2/ημέρα, η εγκατεστημένη ισχύς είναι μόλις 2,3 MW.

Απ' την άλλη βέβαια η Ελλάδα κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό ηλιακών συλλεκτών για τη θέρμανση του ζεστού νερού, καλύπτοντας το 22% των αναγκών της σε θέρμανση του νερού, και μάλιστα είναι η πρώτη εξαγωγική χώρα σε συλλέκτες παγκοσμίως.

Ένα σενάριο αξιοσημείωτης διείσδυσης της παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στα μικρά νησιωτικά δίκτυα, θα συνέβαλε αφενός στη μεγαλύτερη σταθερότητα του δικτύου, δεδομένου ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια δεν παρουσιάζει αξιοσημείωτες διακυμάνσεις, ιδιαίτερα όταν υπάρχει συνεχής ηλιοφάνεια, αφετέρου στην μείωση της ακριβής κάλυψης των αιχμών ζήτησης που παρουσιάζονται ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες και τις μεσημεριανές ώρες λόγω της χρήσης των κλιματιστικών και της αυξημένης τουριστικής κίνησης.

Αν και οι φ/β γεννήτριες δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να αντιμετωπιστούν ως σταθμοί βάσης από την ηλεκτρική εταιρία, έστω και για συγκεκριμένο διάστημα της ημέρας, σίγουρα μειώνουν κατά ορισμένο ποσοστό το συνολικό φορτίο ζήτησης στο δίκτυο διανομής. Η παραπάνω παρατήρηση αποκτά μεγάλη σημασία σε περιοχές μεγάλης τουριστικής κίνησης όπως για παράδειγμα την Κρήτη, οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά στη μέση κατανάλωση τους θερινούς μήνες απ' ότι τους χειμερινούς (πενταπλάσια στο συγκεκριμένο παράδειγμα). Είναι προφανές ότι η μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που συναντάται τους θερινούς μήνες συνεχούς ηλιοφάνειας, θα μπορούσε να ανακουφίσει το δίκτυο από τις αιχμές, καθώς και τα σχέδια του διαχειριστή του δικτύου για τις μελλοντικές επεκτάσεις στον τομέα της παραγωγής και της διανομής, καθώς θα απαιτούνται πολύ λιγότερες εφεδρείες.

Ίσως έχει πρακτική αξία η σύγκριση του αυξημένου κόστους που θα συνεπαγόταν η εγκατάσταση χιλιάδων για παράδειγμα μικρών αυτόνομων συστημάτων με γεννήτριες ΑΠΕ σε κατοικίες ή οικισμούς, με το κόστος αθροιστικά της παραγωγής των αιχμών από το ντίζελ, της μακροπρόθεσμης εγκατάστασης νέων μεγάλων μονάδων παραγωγής από συμβατικές πηγές και της επέκτασης του εξοπλισμού μεταφοράς και διανομής για την κάλυψη της επιπλέον φόρτισης.

Παράλληλα θα μειωνόταν το ποσοστό των βλαβών στα δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης που προκύπτουν από την υπερφόρτιση τους σε περιόδους μεγάλων αιχμών.

Η διασύνδεση τέτοιων διατάξεων παραγωγής με το κεντρικό δίκτυο μέσω μικροδικτύων θα είχε ως αποτέλεσμα την αδιάλειπτη παροχή ενέργειας σε περίπτωση διακοπής στο κεντρικό δίκτυο. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου απαιτείται αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί ένα νοσοκομείο, στο οποίο μεγάλο μέρος των φορτίων του είναι επείγοντα. Ένα μικροδίκτυο σε νοσοκομείο θα μπορούσε να περιλαμβάνει μια μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, έχοντας σαν καύσιμο το ντήζελ, το φυσικό αέριο ή κυψέλες καυσίμου. Η διασύνδεση του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο, θα εξασφάλιζε την παροχή μέρους της ενέργειας για την κάλυψη της κατανάλωσης από το τελευταίο. Σε περίπτωση δε σφάλματος ή διακοπής στο κεντρικό δίκτυο, η αυτόματη απόζευξη από αυτό, θα εξασφάλιζε την διατήρηση της τάσης στο κτίριο.

Ενώ θα ήταν λογικό λοιπόν μια χώρα σαν την Ελλάδα, με τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα να πρωτοστατεί στην προώθηση του ηλιακού ηλεκτρισμού, δυστυχώς οι στατιστικές την κατατάσσουν απ' τις τελευταίες στην εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκής ισχύος ανά κάτοικο. Οι λόγοι που έχουν να κάνουν με αυτό το –εν πρώτοις- παράδοξο είναι πολλοί. Βασικότερος όμως είναι το γεγονός του φτηνού ηλεκτρισμού στην Ελλάδα που προέρχεται από τα μεγάλα λιγνιτικά πεδία, αλλά και τα υδροηλεκτρικά φράγματα. Παραπέρα, η Ελλάδα κατατάσσεται στις τελευταίες χώρες όσον αφορά τα κίνητρα που παρέχονται από την πολιτεία για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών από ιδιώτες.

Αυτό προκύπτει τόσο από τη μη ύπαρξη επιδότησης και φοροελαφρύνσεων για την αγορά του ακριβού εξοπλισμού της ηλιακής γεννήτριας και των ηλεκτρονικών ισχύος, όσο και από τη μη επιδότηση της ηλιακής κιλοβατώρας, από τη στιγμή που ο παροχέας του δικτύου αγοράζει τον ηλεκτρισμό που προέρχεται από φωτοβολταϊκά στην τιμή πώλησης.

Παρά ταύτα το εθνικό σχέδιο δράσης για την κλιματική αλλαγή προβλέπει την εγκατάσταση συνολικά 15 MW φωτοβολταϊκών μέχρι το 2010. Για την επίτευξη αυτού του στόχου προς το παρόν κίνητρα δίνονται μόνο για εμπορικούς σκοπούς, τη δημιουργία δηλαδή μεγάλων ηλιακών πάρκων. Αναφορές υπάρχουν στο συγκεκριμένο σχέδιο για ένα μέτρο παρόμοιο με αυτό που έχουν θεσπίσει άλλα ευρωπαϊκά κράτη, για την εγκατάσταση 10.000 ηλιακών συστημάτων σε στέγες σπιτιών. Η συμβολή πάντως της ηλιακής ενέργειας για την αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου στην Ελλάδα, εμφανίζεται στις αναφορές των αρμόδιων φορέων πολύ υποτιμημένη.

Η μελέτη αυτή ενός πρότυπου μικροδικτύου, τόσο σε απομονωμένη λειτουργία όσο και σε παράλληλη λειτουργία με το κεντρικό δίκτυο χαμηλής τάσης, ελπίζουμε να συμβάλει στην προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αφενός και αφετέρου στην ανάπτυξη μεθόδων αξιόπιστης, αποδοτικής και φιλικής προς το περιβάλλον παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ακόμη και σε απομονωμένες περιοχές. Οι στόχοι αυτοί με τη σειρά τους μπορούν να συνεισφέρουν στην εκπλήρωση των διεθνών δεσμεύσεων για την αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου, την προστασία του περιβάλλοντος και την ενεργειακή απεξάρτηση από το πετρέλαιο.

Από την πλευρά του ηλεκτρολόγου μηχανικού, αποκτά μεγάλη σημασία η μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που αν και μικρό στην παραγωγική ικανότητα, λειτουργεί με τις βασικές αρχές των μεγάλων ηλεκτρικών δικτύων, και εκμεταλλεύεται την πιο άφθονη και καθαρή ενεργειακή πηγή στον πλανήτη, τον ήλιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΟΥ

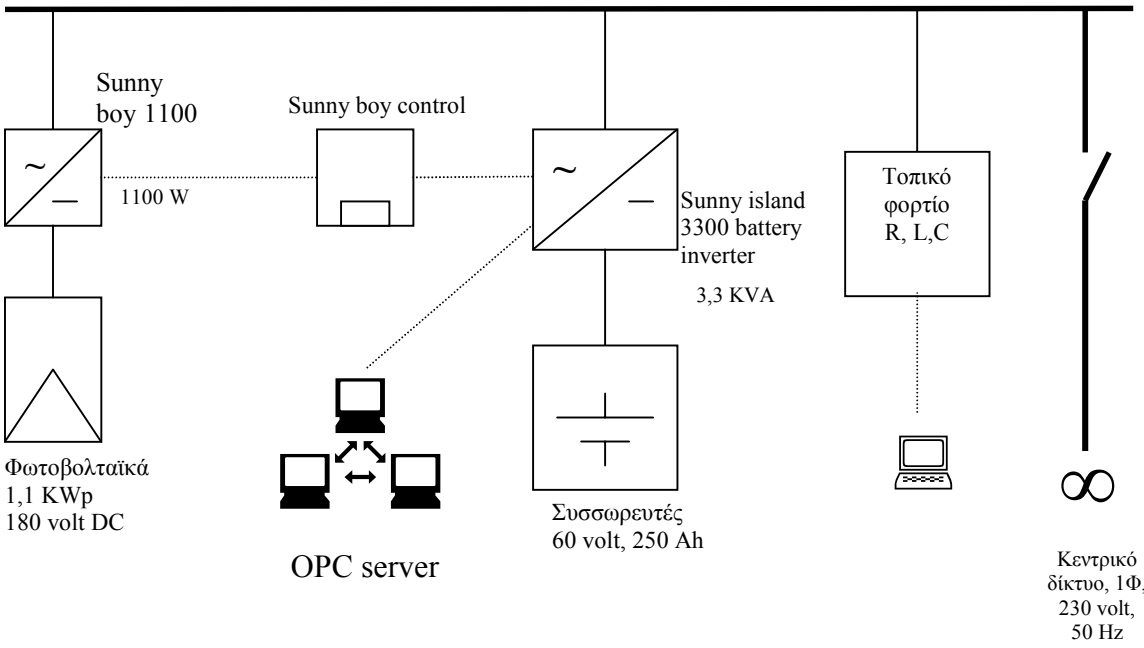
2.1 Γενική περιγραφή

Το μικροδίκτυο που είναι εγκατεστημένο στο εργαστήριο ηλεκτρικών μετρήσεων έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί τόσο ως σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η οποία παρέχεται στο κεντρικό δίκτυο, όσο και ως αυτόνομο σύστημα ικανού να καλύψει ζήτηση ισχύος 3,3 KVA και αιχμής 4,3 KVA.

Το μικροδίκτυο περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύος 1100Wp, αντιστροφέα DC/AC για τα φωτοβολταϊκά, συσσωρευτές μολύβδου οξέως 2V/250Ah, πρωτότυπο αντιστροφέα για τους συσσωρευτές, διατάξεις ελέγχου και φορτία.

Το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργεί τόσο αυτόνομα, όσο και παραλληλισμένο με το κεντρικό δίκτυο χαμηλής τάσης. Τα φωτοβολταϊκά είναι η πηγή της ενέργειας, ενώ οι συσσωρευτές χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αυτής καθώς και για τον έλεγχο της τάσεως και της συχνότητας. Ο κεντρικός έλεγχος των μεγεθών αυτών γίνεται από τον αντιστροφέα των συσσωρευτών, sunny island.

Παρακάτω δίνεται ένα συνοπτικό διάγραμμα του μικροδικτύου.



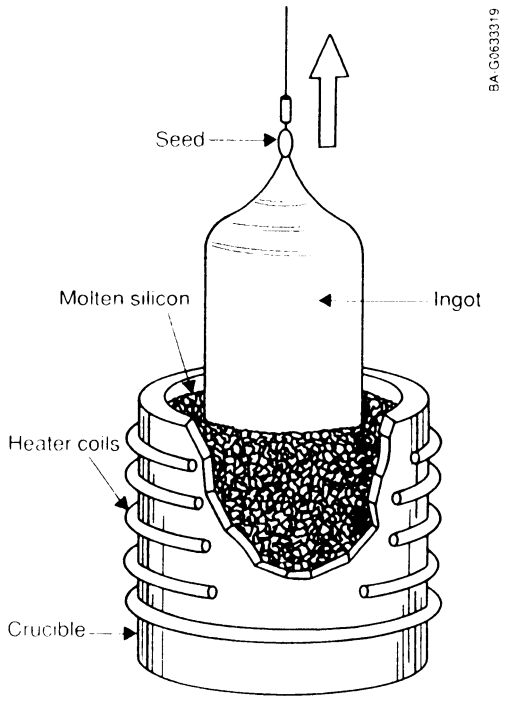
2.2 Φωτοβολταϊκές κυψέλες

Η βασικότερη συνιστώσα του μικροδικτύου είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα οποία παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια από τον ήλιο. Κάθε συλλέκτης αποτελείται από ένα συνδυασμό φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά ή κατά ομάδες παράλληλα. Κάθε φ/β στοιχείο συντίθεται από μονοκρυσταλλικό ή πολύκρυσταλλικό πυρίτιο, ή από μείγματα βαρέων μετάλλων, σχηματίζοντας μια δίοδο p-n.

2.2.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Φωτοβολταϊκό φαινόμενο αποκαλείται η εμφάνιση διαφοράς δυναμικού στα άκρα μιας διόδου η οποία ακτινοβολείται με ηλιακή ενέργεια. Στη συγκεκριμένη περίπτωση του μονοκρυσταλλικού πυριτίου, η δίοδος p-n αποτελείται από δύο στρώματα πυριτίου υψηλής καθαρότητας της τάξης του 99,999999%, στα οποία έχουν εγχυθεί οι κατάλληλες προσμίξεις. Η μέθοδος παρασκευής τόσο υψηλής καθαρότητας πυριτίου είναι που κάνει την παρασκευή του δαπανηρή.

Αρχικά το πυρίτιο ανατήκεται και μετατρέπεται σε αέριο τριχλωροσιλάνιο που αποχωρίζεται από τις διάφορες προσμίξεις με κλασματική απόσταξη. Το αέριο αυτό ανάγεται με υδρογόνο και συμπυκνώνεται έτσι πυρίτιο ακόμη μεγαλύτερης καθαρότητας, το οποίο τήκεται στους 1410 ^{0}C και ανακρυσταλλώνεται σε κυλινδρική μονοκρυσταλλική μορφή. Η μέθοδος αύτη, αποκαλούμενη και μέθοδος Czochralski, έχει ως τελικό προϊόν έναν μεγάλο κύλινδρο διαμέτρου περίπου 10 εκατοστών από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.



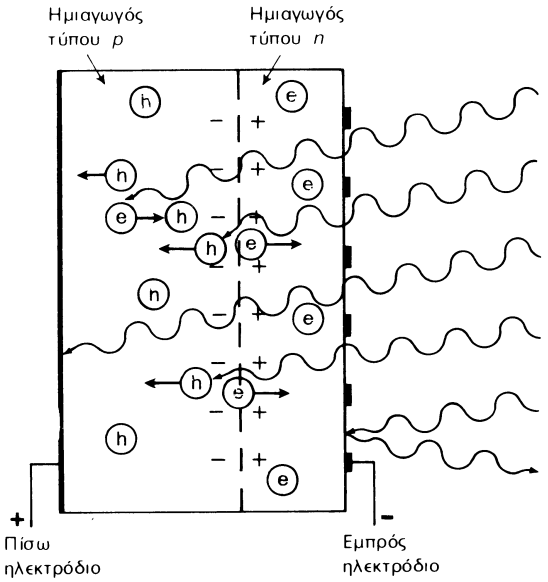
***Εικόνα 2.1* - Διαδικασία παρασκευής ράβδου πυριτίου. Το πυρίτιο θερμαίνεται με υψηλή θερμοκρασία μέσα σε δοχείο και αργά αργά περιστρέφεται προς τα πάνω, σχηματίζοντας μία ράβδο πυριτίου, διαμέτρου περίπου 10cm.**

Στη συνέχεια αυτό κόβεται σε λεπτούς δίσκους πάχους περίπου 0,5 mm οι οποίοι διαμορφώνονται σε διόδους p-n με επίταξη. Η διαδικασία κοπής σε τόσο λεπτές φέτες είναι που κάνει πολύ δαπανηρή την όλη αυτή διεργασία, καθώς το 50% του υλικού του κρυστάλλου χάνεται κατά τη διάρκεια της κοπής και της λείανσης. Στους δίσκους αυτούς επικολ-

λούνται από την εμπρός και την πίσω πλευρά ηλεκτρόδια, τα οποία θα απάγουν το παραγόμενο ρεύμα. Από την μπροστινή πλευρά του στοιχείου όπου είναι απαραίτητο να εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία το ηλεκτρόδιο διαμορφώνεται σε μορφή σχάρας καλύπτοντας το 15% της επιφάνειας του στοιχείου, και αποτελείται συνήθως από κράματα του αργύρου. Αντίθετα από την πίσω πλευρά του στοιχείου δεν εισέρχεται ακτινοβολία έτσι καλύπτεται όλη από ηλεκτρόδιο, συνήθως ένα φύλλο αλουμινίου.

Κάθε συλλέκτης αποτελείται από φ/β στοιχεία τα οποία είναι συνδεμένα μεταξύ τους σε σειρά. Προσπίπτοντας η ηλιακή ενέργεια στην πάνω επιφάνεια των στοιχείων, παράγονται ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), μέρος των οποίων διαχωρίζεται με την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα μπρος δημιουργώντας διαφορά δυναμικού στις δύο όψεις του στοιχείου.

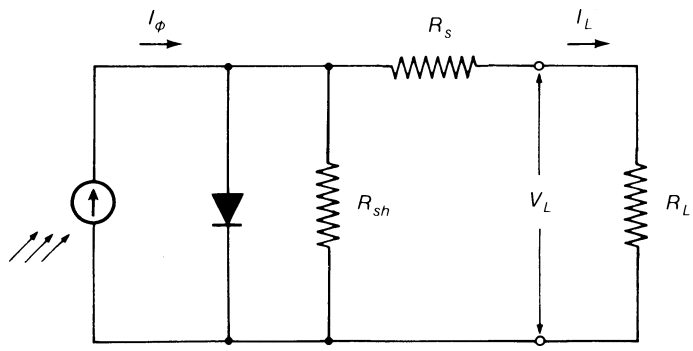
Σε κάθε στοιχείο παράγεται περίπου μια διαφορά δυναμικού 0,5 Volt και ισχύς 0,4 Watt, οπότε αθροιζόμενη σε όλα τα σε σειρά στοιχεία δίνει περίπου 17,6 Volt (για ένα συλλέκτη 36 στοιχείων εν σειρά).



Εικόνα 2.2 **- Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η ηλιακή ενέργεια, προσπίπτοντας στη δίοδο p-n, διαχωρίζει οπές και ηλεκτρόνια δημιουργώντας διαφορά δυναμικού.**

Βεβαίως, η ενέργεια που προσπίπτει υπό μορφή φωτονίων στο στοιχείο δεν μετατρέπεται όλη σε ηλεκτρική ενέργεια παρά μόνο ένα μικρό ποσοστό της. Η υπόλοιπη μετατρέπεται σε θερμότητα στο στοιχείο αφού δεν έχουν όλα τα φωτόνια ενέργεια μεγαλύτερη από αυτή της διόδου πυριτίου, οπότε διαπερνούν το στοιχείο και προσπίπτουν στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο της πίσω πλευράς αυτού, και τελικά η ενέργειά τους μετατρέπεται σε θερμότητα. Έτσι τα φωτοβολταϊκά αναπτύσσουν αρκετά μεγάλες θερμοκρασίες όταν λειτουργούν, που φθάνουν ως τους 80 ^{o}C. Άλλο μέρος της ενέργειας δεν απορροφάται καθόλου από το στοιχείο αλλά ανακλάται πάλι στο περιβάλλον.

Τελικά ένα ποσοστό της τάξης του 5-18% μετατρέπεται από ηλιακή σε ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 2.3 **- Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου, περιλαμβάνοντας την αντίσταση σειράς και την παράλληλη αντίσταση.**

Παρακάτω φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, λαβαίνοντας υπ' όψιν τόσο την αντίσταση σειράς R_s που συναντά το παραγόμενο φωτόρευμα μέσα στον ημιαγωγό, όσο και την παράλληλη αντίσταση R_{sh} η οποία οφείλεται στην μη ιδανική συμπεριφορά της διόδου.
Το παραγόμενο φωτόρευμα από το στοιχείο είναι:

$$I_\phi = I_0\left[\exp\left(\frac{eV}{\gamma kT}\right)-1\right]$$, όπου I_0 το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου

Με την παρεμβολή όμως των δύο αντιστάσεων, το τελικό ρεύμα που μπορεί να εξαχθεί από το στοιχείο είναι:

$$I_L = \frac{I_\phi - I_0\left[\exp\left(\frac{e(V_L - I_L \times Rs)}{\gamma \times k \times T}\right)-1\right] - \frac{V_L}{R_{sh}}}{\left(1+\frac{R_s}{R_{sh}}\right)}$$, όπου:

V_L: η τάση εξόδου του στοιχείου
γ: συντελεστής ποιότητας της διόδου (μεταξύ 1 και 2)
K: σταθερά Boltzmann
T: η απόλυτή θερμοκρασία

2.2.2 Άλλες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών

Η τεχνολογία μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι μέχρι σήμερα η πιο αποδοτική εμπορική μέθοδος για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική με ένα ποσοστό απόδοσης 14-18%. Μικρότερες αποδόσεις επιτυγχάνονται με στοιχεία πολυκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου.

Κατά τη διαδικασία παρασκευής πολυκρυσταλλικού πυριτίου, αυτό θερμαίνεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και έπειτα στερεοποιείται σε άτακτη μορφή. Έπειτα ο κρύσταλλος κόβεται σε λεπτές φέτες και δημιουργείται το στοιχείο. Οι αποδόσεις που συναντούνται στα στοιχεία πολυκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου είναι της τάξης του 11-14% και 5-7% αντίστοιχα. Αν και τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου δεν φαίνεται να υστερούν σε άλλα χαρακτηριστικά πέρα από τη μικρότερη απόδοση, τα φ/β άμορφου πυριτίου έχουν ως βασικό μειονέκτημα πέρα από τη μικρή απόδοση, την μικρή αντοχή τους στην υπεριώδη ακτινοβολία του ηλίου, πράγμα που μειώνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους. Τόσο για τα μονοκρυσταλλικά όσο και για τα πολυκρυσταλλικά έχουν επιβεβαιωθεί αλλά

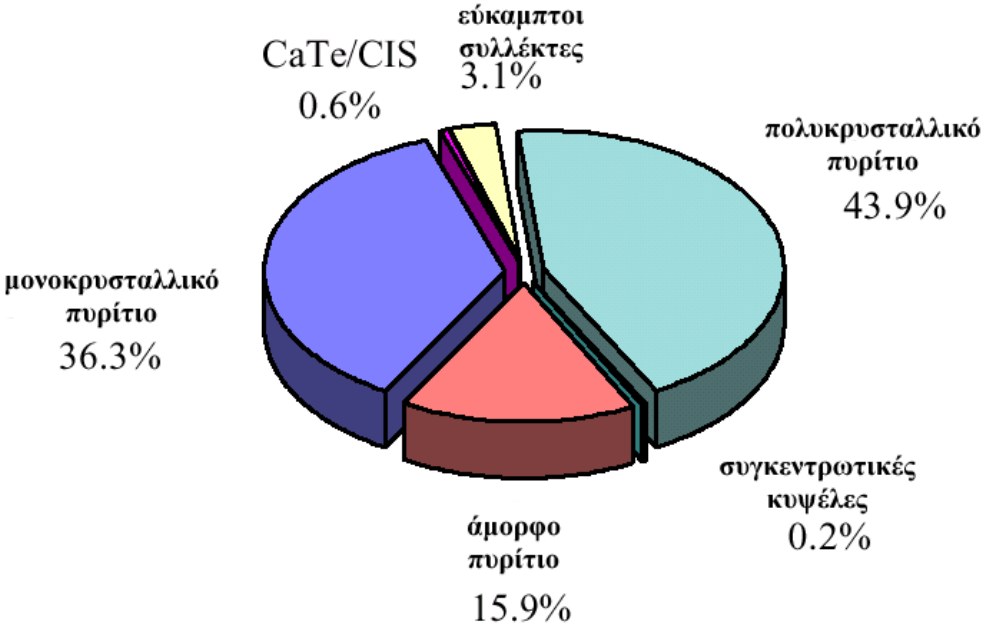
και δίνεται ως εγγύηση από τους κατασκευαστές τους διάρκειες ζωής 20-30 έτη, για τα φ/β άμορφου πυριτίου αυτή δεν ξεπερνά τα 6-10 έτη.

Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερες τεχνολογίες αναπτύσσονται για την παραγωγή φωτοβολταϊκών. Μερικές από αυτές ξεφεύγουν από το πυρίτιο ως βασικό συστατικό και χρησιμοποιούν στοιχεία όπως χαλκού ινδίου-δισεληνίου (CIS), αρσενικούχου γαλλίου (Ga-AS), θειούχου καδμίου (CdS). Οι τεχνολογίες αυτές χαρακτηρίζονται ως thin film, καθώς το πάχος των στοιχείων είναι μερικά μόνο μm, εν συγκρίσει με την τάξη των 200-400μm, που έχουν τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Μειονεκτούν ωστόσο στο γεγονός ότι τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τις περισσότερες φορές βαριά μέταλλα, υλικά καθόλου φιλικά προς το περιβάλλον, ένα σημείο στο οποίο τα φωτοβολταϊκά υποτίθεται ότι ήρθαν να δώσουν λύση.

Επίσης νέες μέθοδοι δοκιμάζονται για να γίνει λιγότερο ενεργοβόρα η παραγωγή του καθαρού πυριτίου, περιορίζοντας τις απώλειες σε ακριβό καθαρό πυρίτιο (π.χ. μέθοδος EFG, edge defined film fed growth).

2.2.3 Η αγορά των φωτοβολταϊκών σήμερα

Αναμφίβολα την πρωτοκαθεδρία στην αγορά των φωτοβολταϊκών κατέχουν οι τεχνολογίες του μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Οι μεγαλύτεροι παραγωγοί φ/β είναι σήμερα η Ιαπωνία, οι ΗΠΑ και ακολουθεί η Ευρωπαϊκή Ένωση. Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει την κατανομή των παραγόμενων φ/β ανά τεχνολογία σήμερα.



Εικόνα 2.4 **- Μερίδιο της αγοράς ανά τεχνολογία φωτοβολταϊκών συλλεκτών. Πηγή: [26]**

Ωστόσο υπάρχει μια τάση για μεγαλύτερη παραγωγή στοιχείων πολυκρυσταλικού πυριτίου, τα οποία αφενός μεν έχουν υψηλές αποδόσεις, αφετέρου έχουν λογικό κόστος παραγωγής εν συγκρίσει με αυτά του μονοκρυσταλλικού.

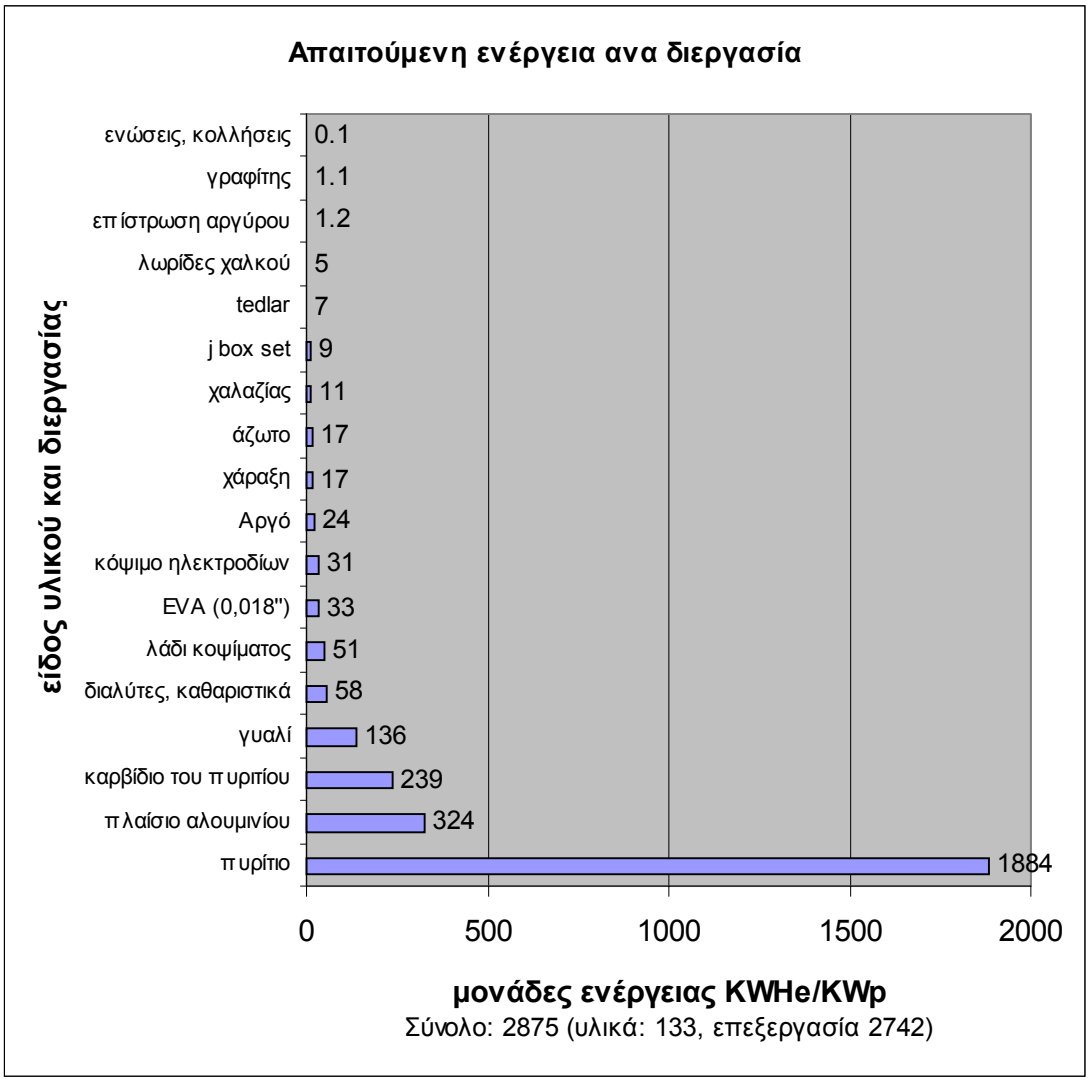
2.2.4 Ενέργεια αποπληρωμής στα φωτοβολταϊκά

Μέχρι σήμερα οι πιο δύσπιστοι σχετικά με την ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από φωτοβολταϊκά, τόνιζαν ότι η ενέργεια που απαιτείται για να παρασκευαστεί ένα φωτο-

βολταϊκό στοιχείο είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που θα παράγει σε όλη του τη διάρκεια λειτουργίας. Ωστόσο το επιχείρημα φαίνεται σήμερα εξ ολοκλήρου λαθεμένο, καθώς μελέτες δείχνουν ότι ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο παράγει την ενέργεια που απαιτήθηκε για την κατασκευή του σε διάρκεια δύο μέχρι τεσσάρων ετών λειτουργίας του.

Συγκεκριμένα, για την μελέτη της ενεργειακής αποπληρωμής ενός φ/β χρειάζεται να μετρηθεί η ενέργεια που παράγει αυτό σε ένα έτος (KWh/m^2/έτος) και να συγκριθεί με την ενέργεια που απαιτήθηκε να κατασκευασθεί τόσο ο ίδιος ο συλλέκτης όσο και τα επιμέρους υλικά του.

Για ένα τυπικό συλλέκτη των 75 Wp, τεχνολογίας μονοκρυσταλλικού πυριτίου, υπολογίστηκε ότι απαιτούνται περίπου 2.875 κιλοβατώρες ενέργειας για να παραχθεί 1 KWp φωτοβολταϊκών (βλέπε πίνακα παρακάτω).



Πίνακας 2.1 **– Απαιτούμενη ενέργεια ανά διεργασία για την κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού. Πηγή: [27]**

Η ενέργεια που θα παραχθεί από το πλαίσιο εξαρτάται φυσικά από το μέρος που θα τοποθετηθεί, δηλαδή από το μέσο όρο της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας της περιοχής. Θεωρώντας ότι για ένα πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου η απόδοσή του δεν θα πέσει κάτω από το 80% της ονομαστικής του τιμής για 25 έτη, πολλαπλασιάζοντας την ετήσια παραγόμενη ενέργεια επί τα χρόνια λειτουργίας του βρίσκουμε την ολική παραγόμενη ενέργεια στη διάρκεια ζωής του. Θεωρώντας μια μέση τιμή 1700 KWh/m^2/έτος βρίσκουμε ότι για 25 έτη

θα παράγει 42500 KWh. Βλέπουμε ότι η τιμή αυτή είναι 15πλάσια από την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του.

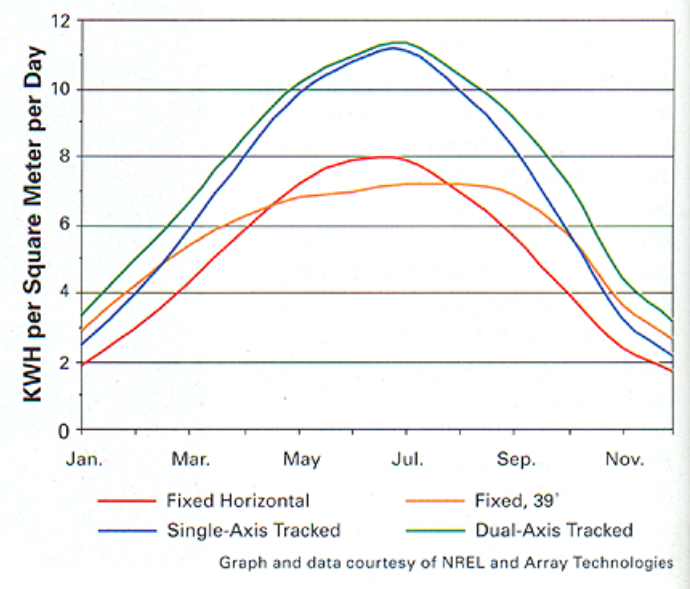
Όλες αυτές οι μετρήσεις είναι βέβαια αρκετά ασαφείς, καθώς πολλοί παράγοντες δεν λαμβάνονται υπ' όψιν, όπως ότι το φωτοβολταϊκό μπορεί να συνεχίσει να παράγει ενέργεια και μετά από 25 χρόνια. Επίσης υπάρχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στην ενέργεια που απαιτείται για τους διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών. Για παράδειγμα στα φ/β ινδίου-δισεληνίου (CIS) το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας για την παρασκευή του δεν καταναλώνεται στο υλικό του αλλά στο αλουμίνιο που συνήθως περιβάλλει το πλαίσιο, καθώς το αλουμίνιο χρειάζεται πολύ ενέργεια για να παρασκευαστεί. Λογικό είναι ότι φ/β χωρίς πλαίσιο αλουμινίου έχουν πολύ μικρότερο χρόνο ενεργειακής απόσβεσης.

2.2.5 Η τοποθέτηση και η λειτουργία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας.

Δεδομένης της μικρής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου έχει μεγάλη σημασία να γίνει πλήρης εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας στο μέρος που θα τοποθετηθεί. Γι' αυτόν τον σκοπό ακολουθούνται συγκεκριμένα βήματα τα οποία εξασφαλίζουν την όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση του ηλίου και την βέλτιστη λειτουργία του φωτοβολταϊκού.

- **Ηλιακή ακτινοβολία:** Ο ήλιος διαγράφει συγκεκριμένη τροχιά γύρω από τη γη, και ανάλογα με το που βρίσκεται το σημείο που θα τοποθετηθεί το φ/β, προσδιορίζεται κατάλληλα ο προσανατολισμός του. Η αζιμούθια γωνία ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του ηλιακού συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Για να έχουμε βέλτιστη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας η γωνία πρόσπτωσης πρέπει να είναι κάθετη στο συλλέκτη όπότε και η αζιμούθια γωνία μηδέν. Για το βόρειο ημισφαίριο όπου και βρίσκεται η Ελλάδα, η αζιμούθια γωνία είναι μηδέν, οπότε και ο προσανατολισμός του συλλέκτη πρέπει να είναι προς το νότο. Επίσης η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα, είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο της περιοχής που βρίσκεται αυτός. Για την Αθήνα π.χ. είναι ίση με 38 μοίρες. Για μεγαλύτερη απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι καλύτερο η κλίση των συλλεκτών να μην μένει σταθερή όλο το χρόνο, αλλά να αλλάζει δύο φορές το χρόνο. Για την Αθήνα για παράδειγμα, μια καλή λύση είναι να τοποθετούνται οι συλλέκτες υπό κλίση 60 μοιρών τους χειμερινούς μήνες και 30 μοιρών τους θερινούς.
- **Ηλιακοί ιχνηλάτες:** Μια πιο εξεζητημένη λύση που εφαρμόζεται είναι η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πάνω σε «ηλιακούς ιχνηλάτες» (solar trackers). Οι ηλιακοί ιχνηλάτες, είναι κινούμενες πλατφόρμες πάνω στις οποίες τοποθετούνται οι ηλιακοί συλλέκτες. Οι πλατφόρμες αυτές είναι συνδεδεμένες με κύκλωμα το οποίο ελέγχει κάθε στιγμή την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ένας κινητήρας στη βάση τους επιτρέπει την κίνηση της πλατφόρμας από την ανατολή μέχρι τη δύση. Επίσης συναντώνται εφαρμογές που επιτρέπουν την κίνηση και στο κατακόρυφο επίπεδο, δηλαδή μεταβάλλουν και την κλίση των συλλεκτών. Το κύκλωμα ελέγχου, έχει φωτοαισθητήρες τοποθετημένους πάνω στην πλατφόρμα με ίδια φυσικά κλίση με τους ηλιακούς συλλέκτες. Μια μικρή διαταραχή στον προσανατολισμό της πλατφόρμας θα προκαλέσει αύξηση ή μείωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Εάν υπάρξει αύξηση τότε το κύκλωμα ελέγχου θα περιστρέψει την πλατφόρμα προς την κατεύθυνση που προκάλεσε την αύξηση. Αντίθετα μια μείωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας θα την περιστρέψει προς την αντίθετη κατεύθυνση. Μετρήσεις δείχνουν ότι η χρήση μιας τέτοιας τεχνολογίας μπορεί να αυξήσει την απόδοση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών από 10% τους χειμερινούς μήνες μέχρι 40% τους

θερινούς, εν συγκρίσει με την περίπτωση σταθερά τοποθετημένων συλλεκτών. Ωστόσο, το υψηλό κόστος που συνεπάγεται η εγκατάσταση πολλών τέτοιων μηχανισμών, ιδιαίτερα αν πρόκειται για πολλές συστοιχίες συλλεκτών, αλλά και η μικρότερη μηχανική αντοχή στους ανέμους, δεν έχουν διαδώσει ευρέως αυτή την τεχνολογία. Εναλλακτικές τεχνικές χωρίς τη χρήση κινητήρα και επιπλέον φωτοβολταϊκών για την παρακολούθηση του ηλίου, εφαρμόζονται με την τοποθέτηση δύο ράβδων με αέριο φρέον στα δύο άκρα της πλατφόρμας. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο ράβδων προκαλεί διαφορά βάρους στις δύο ράβδους, άρα και στην όλη πλατφόρμα με αποτέλεσμα να κατευθύνεται προς την μεριά που δέχεται μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία. Αν και η απόκριση είναι πιο αργή και ανακριβής σε σχέση με την πρώτη τεχνική, η έλλειψη μηχανικών και ηλεκτρικών μερών εξασφαλίζει μεγαλύτερη αξιοπιστία στο χρόνο και στις κεραυνικές υπερτάσεις.

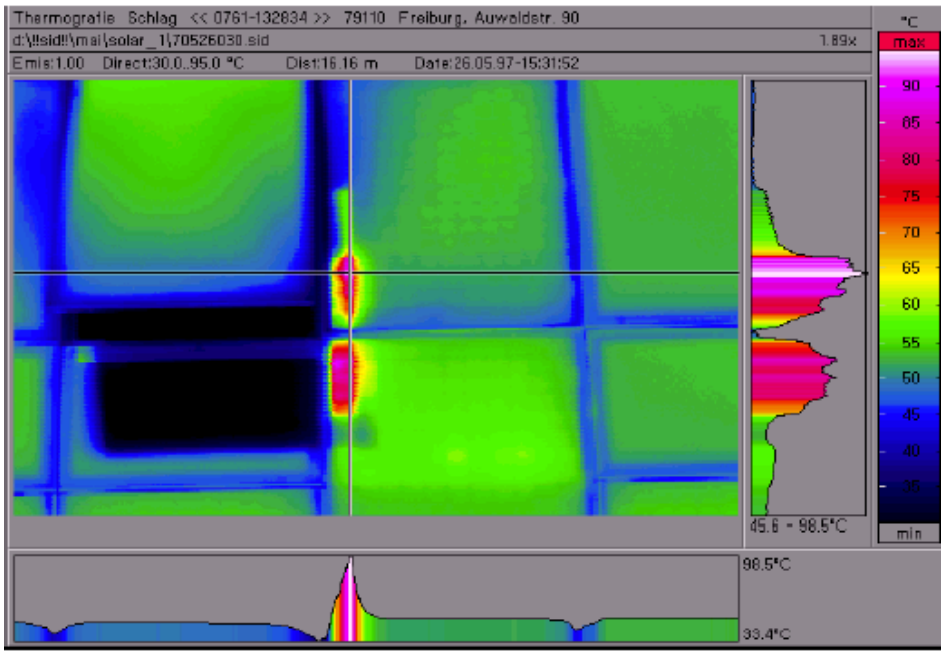


***Εικόνα 2.5* – Παραγόμενη ποσότητα ηλεκτρισμού ανά m^2 από φωτοβολταϊκό πλαίσιο, για διάφορες τεχνικές τοποθέτησης. Από την υψηλότερη καμπύλη: σύστημα παρακολούθησης ηλίου σε δύο άξονες, σύστημα παρακολούθησης με ένα άξονα, τοποθετημένο με κλίση 39, τοποθετημένο οριζόντια. Τοποθεσία Sacramento California. Πηγή: [28]**

- **Ενίσχυση της ηλιακής ακτινοβολίας με κάτοπτρα.** Μια άλλη πρακτική που εφαρμόζεται για την αύξηση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στους συλλέκτες είναι η τοποθέτηση ηλιακών κατόπτρων στις γύρω πλευρές του συλλέκτη ώστε να αντανακλάται η γύρω προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω στον συλλέκτη. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται καθρέπτες ή άλλες αντανακλαστικές επιφάνειες στην κάτω και στις πλαϊνές πλευρές του φωτοβολταϊκού ώστε η ακτινοβολία που πέφτει στα σημεία αυτά να αντανακλάται πάνω στον φωτοβολταϊκό συλλέκτη. Η τοποθέτησή αυτών γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην εμποδίζει την πρόσπτωση τόσο της άμεσης ακτινοβολίας όσο και του διάχυτου φωτισμού απ' το να πέφτει πάνω στον συλλέκτη. Ακόμη πιο εξεζητημένη είναι η τοποθέτηση παραβολικών κατόπτρων ώστε να κατευθύνουν συγκεντρωμένα την ηλιακή ακτινοβολία πάνω στους συλλέκτες. Ωστόσο οι αυξημένες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην περίπτωση αυτή πάνω στον συλλέκτη απαιτούν κάποιας μορφής ψύξη αυτού.

- **Σωστή τοποθέτηση:** Ένας φωτοβολταϊκός συλλέκτης αποτελείται από φ/β στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά. Όταν κάποιο από αυτά σκιαστεί τελείως, τότε η δίοδος αυτή δεν παράγει τάση με αποτέλεσμα να μπλοκάρεται όλη η διαφορά δυνα-

μικού που αναπτύσσεται στα στοιχεία σε σειρά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η απόδοση του φωτοβολταϊκού να μηδενίζεται τελείως, αν πρόκειται για μια ολόκληρη σειρά από στοιχεία τα οποία σκιάζονται, ή να πέφτει τουλάχιστον στο μισό αν πρόκειται έστω και για ένα τελείως σκιασμένο στοιχείο.
Το πιο σημαντικό όμως δεν είναι η ενέργεια που δεν παράγεται στην έξοδο του συλλέκτη, αλλά το ότι η ενέργεια που παράγεται από τα μη σκιασμένα στοιχεία, φτάνει στα άκρα της σκιασμένης διόδου (στοιχείου) και μετατρέπεται φυσικά σε θερμότητα. Η παρατεταμένη αυτή δυσλειτουργία μπορεί να μειώσει σοβαρά τη διάρκεια ζωής του στοιχείου, ακόμη και να το καταστρέψει τελείως ιδιαίτερα αν συμβαίνει το καλοκαίρι όπου έτσι κι αλλιώς αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες.

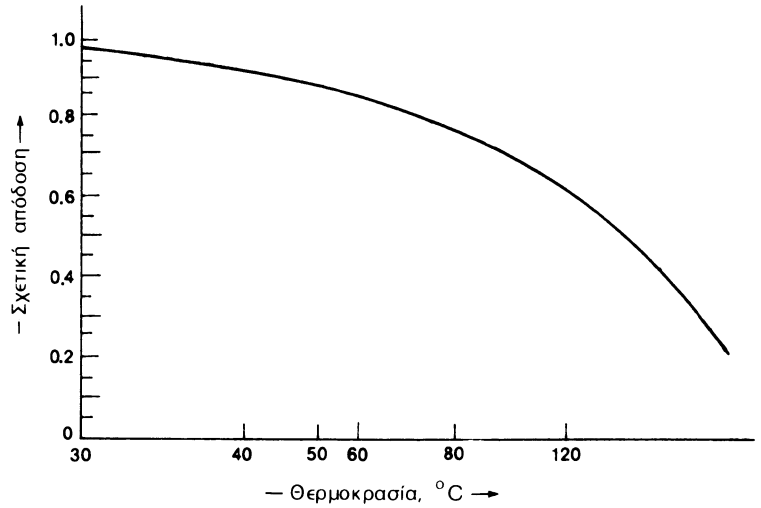


Εικόνα 2.6 **– Φωτοβολταϊκό πλαίσιο που σκιάζεται. Στο σημείο της σκίασης η θερμοκρασία φτάνει τους 90 βαθμούς Κελσίου, όπως φαίνεται την δεξιά στήλη θερμοκρασιών. Πηγή: [25]**

- **Θερμοκρασία**: Η απόδοση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας μειώνεται με τη θερμοκρασία. Συνήθως η θερμοκρασία που αναπτύσσεται πάνω στον συλλέκτη είναι 30 βαθμούς Κελσίου μεγαλύτερη από αυτή του εξωτερικού περιβάλλοντος.
  Το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοιχτοκύκλωσης μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

$$Isc = I_0 \cdot (1 + a \cdot \Delta T)$$
$$Voc = V_0 \cdot (1 - \beta \cdot \Delta T)$$

  όπου ΔΤ είναι η διαφορά θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία αναφοράς T_0 και α, β σταθερές. Από πειραματικές μετρήσεις έχει βρεθεί ότι η απόδοση του φωτοβολταϊκού μειώνεται κατά 0,5% ανά βαθμό Κελσίου, πέρα από τη θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας που είναι 30 ^{o}C. Βέβαια στις μικρές εγκαταστάσεις δεν υπάρχει κάποιος λειτουργικός τρόπος για την μείωση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών συλλεκτών, ωστόσο στις μεγάλες εγκαταστάσεις μερικές φορές χρησιμοποιείται κλειστό κύκλωμα ψύξης με νερό έτσι ώστε να απάγεται η μεγάλη θερμοκρασία που αναπτύσσεται σ' αυτά.



Εικόνα 2.7 – **Απόδοση μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας συναρτήσει της θερμοκρασίας**

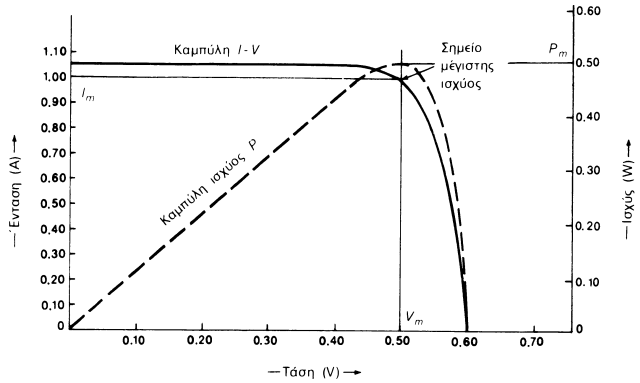
- **Καθαριότητα:** Είναι προφανές ότι για να έχουμε μέγιστη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι απαραίτητο η επιφάνεια των συλλεκτών να είναι καθαρή από σκόνη και άλλες επικαθίσεις. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στο μικροδίκτυο, επικαλύπτονται από ειδικά αντι-ανακλαστικά υλικά για να αποφεύγεται η αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας. Παρομοίως το προστατευτικό τζάμι που καλύπτει τα στοιχεία, είναι φτιαγμένο για να επιτρέπει καλύτερη μετάδοση του φωτός.
- **Απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων**. Σε αντίθεση με άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται πάντοτε από το φορτίο που τροφοδοτεί, δηλαδή την τιμή της αντίστασης που είναι συνδεμένης στα άκρα του. Όταν δεν υπάρχει καθόλου αντίσταση, συναντάται η μέγιστη τάση εξόδου, ή τάσης ανοιχτοκύκλωσης Voc. Τυπική τιμή για συλλέκτες 12V τάσης εξόδου είναι τα 21 Volt. Αντίθετά όταν βραχυκυκλωθούν τα άκρα της γεννήτριας, η τάση μηδενίζεται αλλά έχουμε μέγιστη ροή ρεύματος, ή ρεύμα βραχυκύκλωσης Isc. Ωστόσο, η ισχύς που παράγεται για κάθε ζεύγος τιμών τάσης-έντασης δεν είναι πάντα σταθερή αλλά μηδενίζεται όπως φαίνεται εύκολα στις ακραίες συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης-βραχυκύκλωσης και παρουσιάζει ένα μέγιστο για συγκεκριμένη τιμή τάσης-έντασης. Επιθυμητό είναι λοιπόν σε κάθε εγκατάσταση φωτοβολταϊκών οι συστοιχίες να λειτουργούν παράγοντας τις τιμές αυτές τάσης-έντασης που δίνουν κάθε στιγμή τη μέγιστη ένταση. Όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια τροφοδοτεί απευθείας ένα συγκεκριμένο φορτίο κάτι τέτοιο δεν είναι πραγματοποιήσιμο καθώς η τιμή του φορτίου έχει συγκεκριμένη αντίσταση. Όταν όμως μεταξύ γεννητριών και κατανάλωσης παρεμβάλλονται ηλεκτρονικά για τον έλεγχο της ισχύος, για την ρύθμιση φόρτισης συσσωρευτών, για την ανύψωση ή και την αλλαγή μορφής της παραγόμενης τάσης, τότε υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργούν αυτές σε ένα μέγιστο σημείο. Αυτό το αναλαμβάνουν ειδικοί ανιχνευτές της μέγιστης ισχύος, ή maximum power point trackers (MPPT).

2.2.6 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Η τεχνολογία της ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος, άρχισε να χρησιμοποιείται σχετικά πρόσφατα στις εφαρμογές των φωτοβολταϊκών και αποτελεί πλέον χαρακτηριστικό κάθε καλού αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο ή φορτιστή συσσωρευτών.

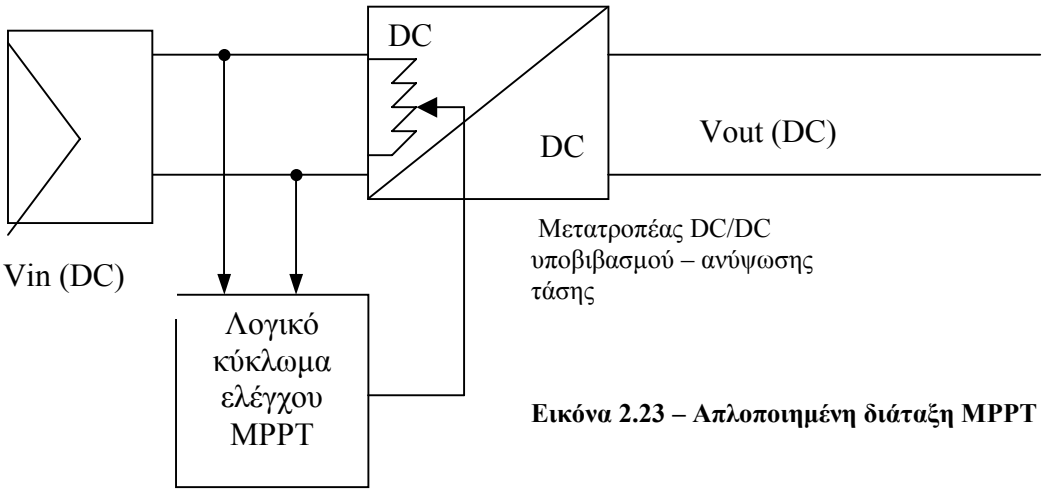
Η λογική πίσω από τη λειτουργία τους είναι η εξής: Παρακολουθώντας συνεχώς τις τιμές τάσης και έντασης εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, προκαλούν ανά τακτά χρονιά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Αν διαπιστωθεί ότι με την ανύψωση της τάσης, αυξάνεται η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία. Αυτό είναι και το σημείο μέγιστης λειτουργίας.

Όπως προαναφέρθηκε στην εξέταση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η ένταση που παράγεται από ένα φ/β στοιχείο, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται αντίστροφα απ' ότι μεταβάλλεται η τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο ζεύγος τάσης – έντασης, το στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Ωστόσο επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο στοιχείο δεν είναι σταθερή, ομοίως σταθερή δεν είναι και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό για κάθε στιγμή το φωτοβολταϊκό στοιχείο να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτά καθορίζονται από την αντίσταση του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης – έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του. Παρακάτω φαίνονται οι χαρακτηριστικές τάσης- έντασης και ισχύος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Εικόνα 2.22 **- Καμπύλες I-V και ισχύος για ένα φωτοβολταϊκό. Η διακεκομμένη καμπύλη ισχύος σχηματίζεται με το γινόμενο των μεγεθών I,V.**

Αυτό επιτυγχάνεται με ένα κύκλωμα DC/DC αντιστροφέα, ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης, στα άκρα της ηλεκτρονικής συσκευής στην οποία εισέρχεται η ισχύς του φωτοβολταϊκού. Ένα απλοϊκό σχεδιάγραμμα dc/dc converter που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της μέγιστης ισχύς εξόδου της φ/β γεννήτριας φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 2.23 – Απλοποιημένη διάταξη MPPT

Η παραγόμενη ισχύς από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι $P = V \cdot I$. Όταν η λειτουργία του στοιχείου μετατοπιστεί σε διαφορετικό σημείο της καμπύλης V-I λόγω μεταβολής στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ή μεταβολή του φορτίου, τότε η τάση μεταβάλλεται κατά dV και η ένταση κατά dI. Τότε η ισχύς είναι $\mathrm{P} = \mathrm{V} \cdot \mathrm{I} = (V + dV) \cdot (I + dI)$. Αγνοώντας τους όρους δεύτερης τάξης έχουμε:

$$\mathrm{dP} = d\mathrm{V} \cdot \mathrm{I} + d\mathrm{I} \cdot \mathrm{V}$$

Όπως είναι φανερό απ' την καμπύλη ισχύος του φωτοβολταϊκού, ο όρος dP (η κλίση δηλαδή της καμπύλης ισχύος) είναι μηδέν στο σημείο μέγιστης ισχύος. Στο σημείο αυτό (maximum power point) λοιπόν η άνωθεν εξίσωση γίνεται:

$$0 = \mathrm{dV} \cdot \mathrm{I} + d\mathrm{I} \cdot \mathrm{V} \Rightarrow$$

$$\frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I}$$

Στην εξίσωση αυτή, ο πρώτος όρος εκφράζει την δυναμική αντίσταση της πηγής (Z_d) ενώ ο δεύτερος την στατική αντίσταση (Z_s). Με βάση αυτή την εξίσωση υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος:

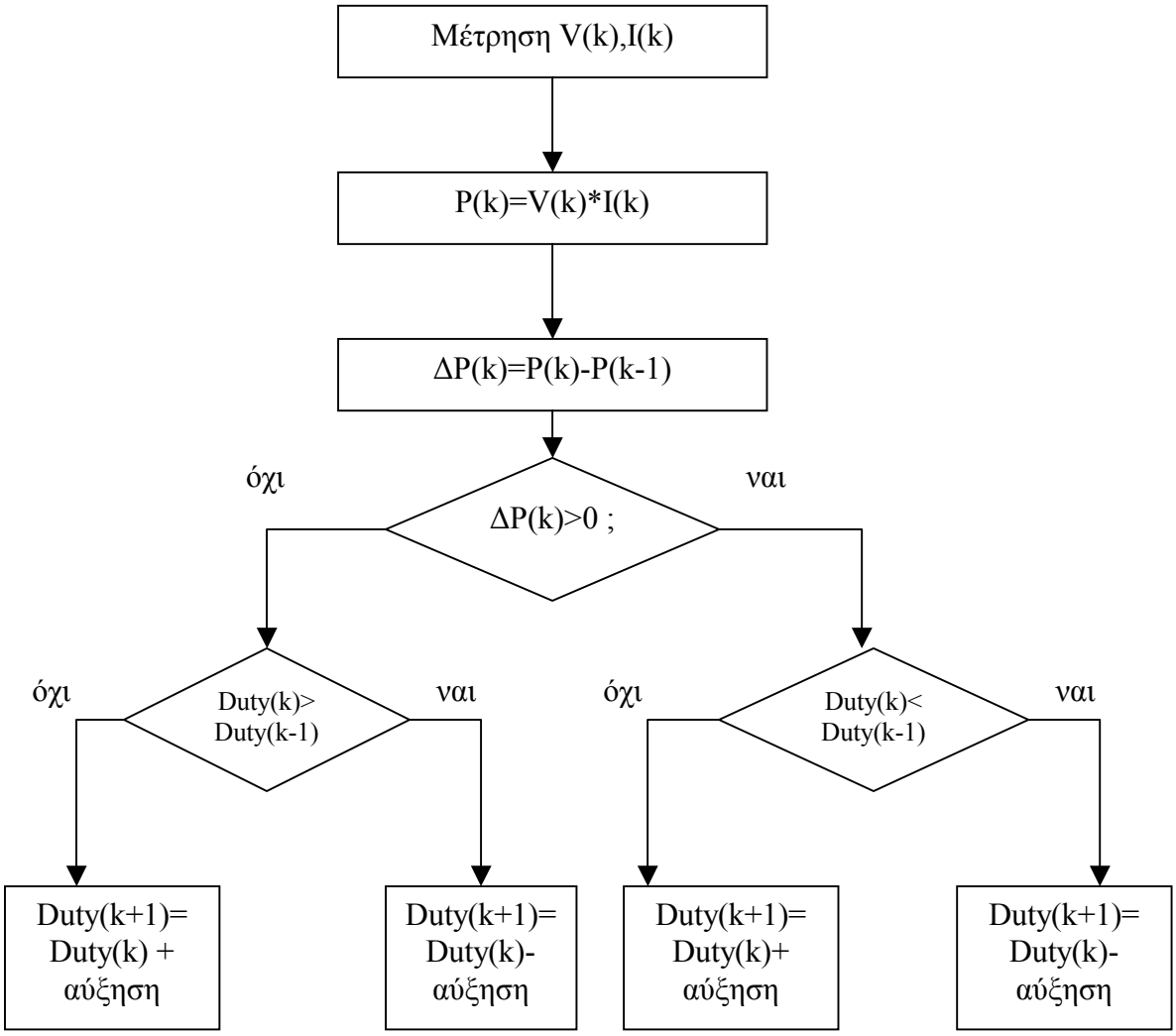
Α) Μία διαταραχή ρεύματος εισάγεται περιοδικά στην φωτοβολταϊκή πηγή ενώ μετρούνται η δυναμική αντίσταση αυτής $Zd = \frac{dV}{dI}$ και η στατική αντίσταση $Zs = \frac{V}{I}$. Η τάση λειτουργίας αυξάνεται ή μειώνεται μέχρι να ικανοποιηθεί η εξίσωση του σημείου μέγιστης ισχύος, δηλαδή $Zd = -Zs$.

Β) Μια δεύτερη μέθοδος ελέγχου είναι να αυξάνεται η τάση όσο ισχύει η συνθήκη $\frac{dP}{dV} > 0$, δηλαδή η ισχύς αυξάνεται με αύξηση της τάσης. Σε αντίθετη περίπτωση η τάση μειώνεται. Η τάση σταθεροποιείται όταν μηδενίζεται σχεδόν αυτός ο ρυθμός μεταβολής.

Γ) Μια τρίτη κάνει χρήση του γεγονότος ότι στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία ο λόγος τάσης στη μέγιστη ισχύ προς τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι σταθερός, δηλ. $\frac{Vmpp}{Voc} = K = \sigma\tau\alpha\theta.$ (περίπου 0,72 για τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου). Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο τοποθετείται δίπλα από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες για να μετράται συνεχώς η τάση ανοιχτοκύκλωσης αυτού. Η τάση τότε των παραγωγικών φ/β στοιχείων ρυθμίζεται κάθε στιγμή στο σημείο $K \cdot Voc$, που εξασφαλίζει τη μέγιστη ισχύ.

Το λογικό κύκλωμα ελέγχου μετρά την τάση και την ένταση εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, η οποία βέβαια εξαρτάται κάθε στιγμή από την ακτινοβολία που προσπίπτει, τη θερμοκρασία της γεννήτριας και φυσικά από την αντίσταση που συναντά η γεννήτρια στα άκρα της. Εφαρμόζοντας μία από τις παραπάνω μεθόδους, στέλνει σήμα στον DC/DC μετατροπέα να ανυψώσει ή να μειώσει την τάση μέχρι να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος. Ανάλογα με την περίπτωση λοιπόν το συγκεκριμένο κύκλωμα λειτουργεί είτε ως μετατροπέας ανύψωσης είτε ως μετατροπέας υποβιβασμού τάσης.

Εναλλακτικές μορφές ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος χρησιμοποιούν κυκλώματα με μνήμη ώστε να συγκρίνουν τις τρέχουσες μετρούμενες τιμές ισχύος, τάσης, έντασης με προηγούμενες οπότε προσαρμόζουν ανάλογα τη στάθμη της τάσης που θα απορροφήσει ο αντιστροφέας. Ένα λογικό σχήμα ελέγχου αυτής της διαδικασίας φαίνεται αμέσως παρακάτω.



Η συνεχής μέτρηση της τάσης και της έντασης χρησιμεύει στον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος. Η παραγόμενη αυτή ισχύς συγκρίνεται με την ισχύ του προηγούμενου διαστήματος που λήφθηκαν μετρήσεις.

Αν διαφορά των δύο μετρήσεων είναι θετική, δηλαδή η ισχύς αυξήθηκε, τότε ελέγχεται ο βαθμός προσαρμογής του αντιστροφέα στα φωτοβολταϊκά (duty cycle). Αν αυτός είναι μικρότερος από τον προηγούμενο τότε αυξάνεται, διαφορετικά μειώνεται. Έτσι αυξάνεται ή μειώνεται αντίστοιχα η τάση εισόδου του αντιστροφέα.

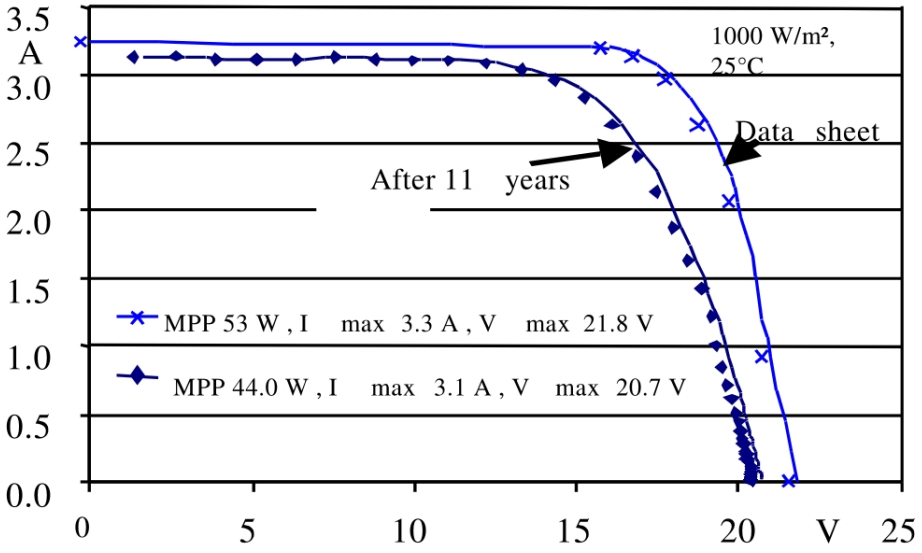
Αντίστοιχα αν η ισχύς μειώνεται, τότε συγκρίνεται ξανά ο βαθμός προσαρμογής του αντιστροφέα. Αν είναι μεγαλύτερος του προηγούμενου, μειώνεται.

Αν ο βαθμός προσαρμογής είναι μικρότερος του προηγούμενου αυξάνεται στο επόμενο βήμα ώστε να αυξηθεί η εισερχόμενη ισχύς.

2.2.7 Διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών στοιχείων

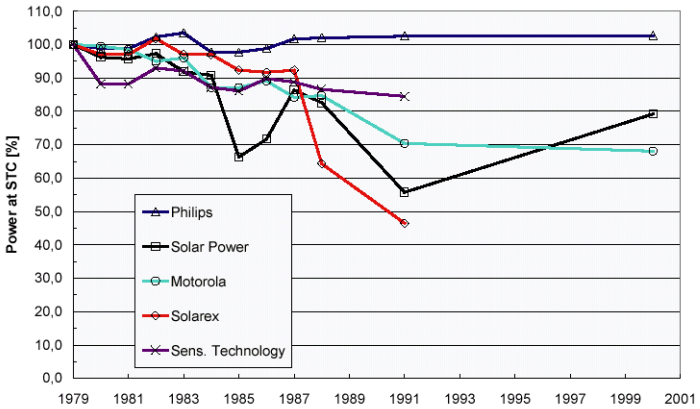
Η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μειώνεται με το χρόνο λειτουργίας τους, με πολύ αργό ρυθμό βέβαια. Κοινό κριτήριο για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής ενός φωτοβολταϊκού θεωρείται από τις εταιρείες παραγωγής, η μείωση της απόδοσής του στο 80% της ονομαστικής του τιμής. Αν και η σχετικά πρόσφατη ευρεία ανάπτυξη των εφαρμογών των φωτοβολταϊκών δεν επιτρέπει μακροχρόνιες δοκιμές για την αντοχή τους στο χρόνο, μελέτες δείχνουν ότι αυτή προσεγγίζει πάρα πολύ την διάρκεια ζωής που δίνεται ως εγ-

γύηση από τους κατασκευαστές. Για τις τεχνολογίες των κρυσταλλικών φ/β πυριτίου η διάρκεια ζωής κυμαίνεται μεταξύ 20-30 έτη, χωρίς να υπάρχουν πολλά στοιχεία ότι η απόδοση τους πέφτει δραματικά μετά από τα 30 έτη. Το παρακάτω σχεδιάγραμμα δείχνει την μείωση της απόδοσης ενός φ/β μετά από 11 έτη.



Εικόνα 2.8 **– Καμπύλες I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου στην αρχή της λειτουργίας του και έπειτα από 11 έτη. Η θεωρητική καμπύλη συμπίπτει περίπου με αυτήν στην αρχή της λειτουργίας του δίνοντας μέγιστη ισχύ 53W (με τάση 21,8V και ρεύμα 3,3A). Αντίθετα, έπειτα από 11 χρόνια, το σημείο μέγιστης λειτουργίας πέφτει στα 44W (με τάση 20,7V και ρεύμα 3,1A). Πηγή: [25]**

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της ονομαστικής ισχύος 5 φωτοβολταϊκών εγκατεστημένων στο σουηδικό εργαστήριο δοκιμών Sandkullen κατά τη διάρκεια 21 ετών.



Εικόνα 2.9 **– Εξέλιξη της απόδοσης 5 διαφορετικών φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά τη διάρκεια 22 ετών. Παρά την αξιοσημείωτη μείωση σε ορισμένα μοντέλα, η απόδοση γενικά δεν μειώνεται πολύ στη διάρκεια δύο δεκαετιών. Ως 100% της απόδοσης ορίζεται αυτή στην αρχή της λειτουργίας τους. Πηγή: [25]**

Είναι προφανές ότι τα φ/β στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου, έχουν βεβαιωμένη διάρκεια ζωής τουλάχιστον 20 ετών, κατά την οποία θα αποδώσουν στο πολλαπλάσιο την ενέργεια που απαιτήθηκε για να παραχθούν. Επιπρόσθετα, ακόμη με αυτή την προβλεπόμενη μείωση της απόδοσής τους με το χρόνο, μπορούν να εξακολουθήσουν να είναι λειτουργικά για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

2.3 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος

Οι μετατροπείς ισχύος επιτελούν τον πιο σημαντικό και πολύπλοκο έλεγχο στο μικροδίκτυο όπως και σε όλες σχεδόν τις διατάξεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μέσω αυτών η παραγόμενη τάση από ΑΠΕ, μετατρέπεται είτε σε συνεχή άλλης στάθμης είτε σε εναλλασσόμενη ελεγχόμενου πλάτους και συχνότητας. Μια διαφορετική μέθοδος θα ήταν η τροφοδότηση με τη συνεχή τάση κινητήρων συνεχούς ρεύματος οι οποίοι με τη σειρά τους κινούν γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος. Η διάταξη αυτή δεν χρησιμοποιείται τόσο λόγω των μεγάλων απωλειών όσο και λόγω κόστους. Γεγονός είναι ότι χωρίς τα ηλεκτρονικά ισχύος θα ήταν πολύ δύσκολος ο έλεγχος όλων των ηλεκτρικής πηγών ενέργειας.

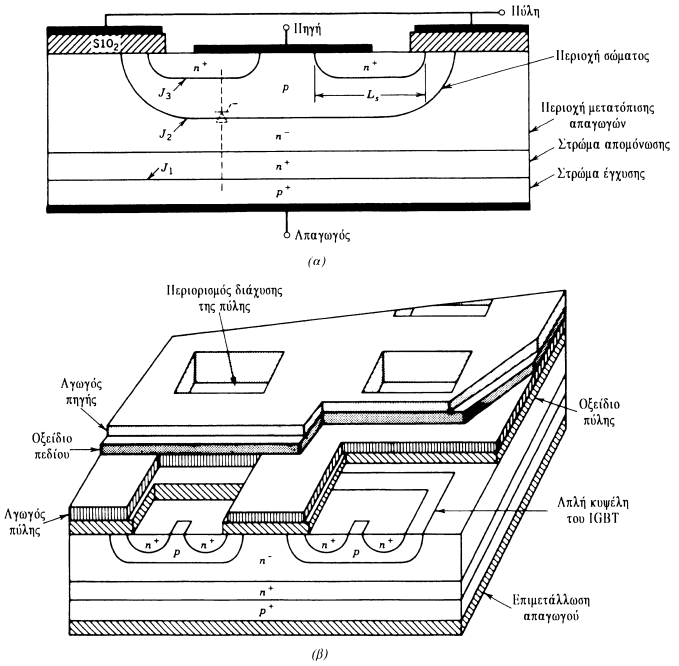
Οι μετατροπείς ισχύος χωρίζονται στις εξής βασικές κατηγορίες:

- Μετατροπείς AC/DC (ανορθωτές)
- Διακοπτικοί μετατροπείς DC/DC
- Αντιστροφείς DC/AC

Μιλώντας γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι όλες οι διατάξεις ΑΠΕ χρησιμοποιούν τις ίδιες βασικές διατάξεις και αρχές λειτουργίας. Οι βασικοί τύποι μετατροπέων που εξετάζουμε είναι ο μετατροπέας DC/DC, και ο αντιστροφέας DC/AC. Πυρήνας των διατάξεων αυτών είναι τα τρανζίστορ ισχύος, τα οποία μέσω των διακοπτικών τους ιδιοτήτων αναλαμβάνουν την μετατροπή της τάσης. Οι σύγχρονες διατάξεις χρησιμοποιούν ως επί το πλείστον τρανζίστορς τύπου IGBT.

2.3.1 Διπολικά τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (IGBT)

Το βασικότερο στοιχείο μιας διάταξης μετατροπέα ή αντιστροφέα ισχύος είναι τα τρανζίστορς τα οποία χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της τάσης εισόδου από τις πηγές, είτε σε άλλης στάθμης συνεχή τιμή (DC/DC) είτε σε εναλλασσόμενη (DC/AC). Η μετατροπή αυτή στηρίζεται στις διακοπτικές ικανότητες των τρανζίστορς ισχύος. Διάφοροι τύποι τρανζίστορς χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών. Τα IGBT αποτελούν ένα συνδυασμό των MOSFET ισχύος και των διπολικών τρανζίστορ επαφής (BJT), δηλαδή τις ταχείες μεταβάσεις από την κατάσταση αποκοπής σε κατάσταση αγωγι-



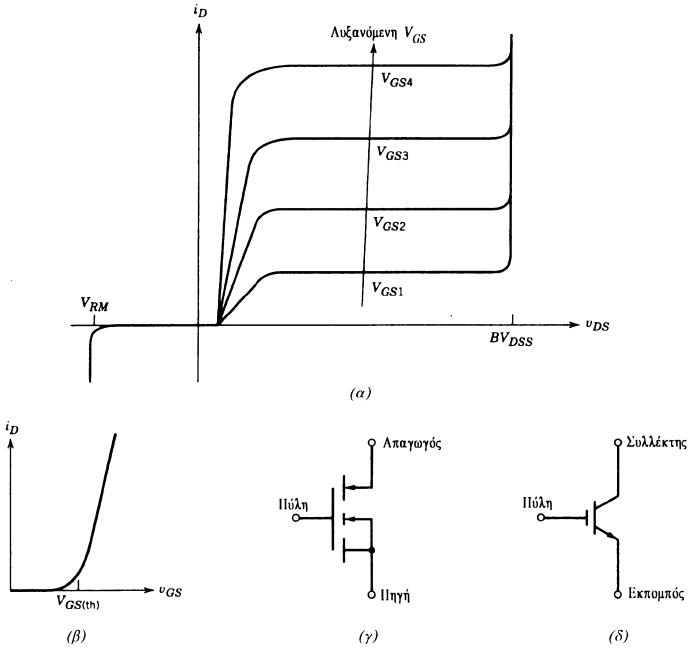
Εικόνα 2.10 **– Κατακόρυφη τομή και προοπτική άποψη ενός IGBT**

μότητας των πρώτων και τις μικρές απώλειες κατά την αποκοπή μεγάλων τάσεων των δεύτερων.

Τυπικοί χρόνοι μετάβασης από κατάσταση αποκοπής σε κατάστασης αγωγιμότητας είναι της τάξεως του 1μsec, ενώ για την μετάβαση αυτή δεν απαιτείται παρά μόνο μια μικρή τάση της τάξεως των 2-3 Volt στην πύλη. Τα IGBT μπορούν να διαχειριστούν μεγάλες τάσεις και ρεύματα που σήμερα φτάνουν τα 1700volt και τα 1200A.

Στο IGBT ο έλεγχος της ροής ρεύματος μεταξύ πηγής (source) και απαγωγού (drain) γίνεται από την πύλη (gate). Ο ακροδέκτης της πηγής είναι κοινός μεταξύ της εισόδου και της εξόδου. Για την μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τα IGBT χρησιμοποιούνται ως διακόπτες, παράγοντας παλμούς τάσης μεταβλητής διάρκειας ώστε να σχηματιστεί στην έξοδο της γέφυρας η ημιτονοειδής κυματομορφή.

Στο πιο κάτω σχήμα φαίνονται οι χαρακτηριστικές ρεύματος τάσης καθώς και το κυκλωματικό σύμβολο του IGBT.



Εικόνα 2.11 **- Χαρακτηριστικές λειτουργίας IGBT. α) Χαρακτηριστική λειτουργίας I-V για IGBT τύπου –n, β) χαρακτηριστική μεταφοράς ρεύματος απαγωγού – τάσης πύλης (Id-Vgs), γ), δ) κυκλωματικά σύμβολα IGBT καναλιού –n.**

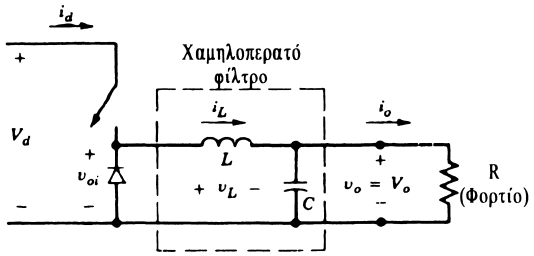
2.3.2 Επισκόπηση μετατροπέων DC/DC

Οι μετατροπείς DC/DC χρησιμοποιούνται για την μετατροπή μιας μη σταθεροποιημένης τάσης συνεχούς ρεύματος σε μια ελεγχόμενη συνεχή τάση εξόδου. Ανάλογα με την σχέση των δύο αυτών τάσεων χωρίζονται σε:

- Μετατροπείς ανύψωσης τάσης
- Μετατροπείς υποβιβασμού τάσης
- Μικτοί μετατροπείς (υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης)
- Μετατροπείς CUK
- Μετατροπείς πλήρους γέφυρας

Από τους τύπους αυτούς βασικοί είναι οι μετατροπείς ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης, ενώ οι υπόλοιποι αποτελούν συνδυασμό των δύο διατάξεων. Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας προκύπτει από το μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.

• Ένας *μετατροπέας υποβιβασμού τάσης*, όπως λέει και το όνομά του, μετατρέπει μια μη ελεγχόμενη DC τάση εισόδου σε ελεγχόμενη DC τάση εξόδου μικρότερης τιμής. Ένα απλοποιημένο κυκλωματικό του διάγραμμα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, αποτελείται από ένα διακόπτη, μία δίοδο, πηνίο και πυκνωτή. Όσο ο διακόπτης είναι κλειστός, η δίοδος πολώνεται ανάστροφα και η είσοδος παρέχει ενέργεια τόσο στο φορτίο όσο και στο πηνίο. Όταν ο διακόπτης ανοίγει, το ρεύμα του πηνίου ρέει μέσω της διόδου προς το φορτίο, μεταφέροντας έτσι μέρος της αποθηκευμένης του ενέργειας προς αυτό.



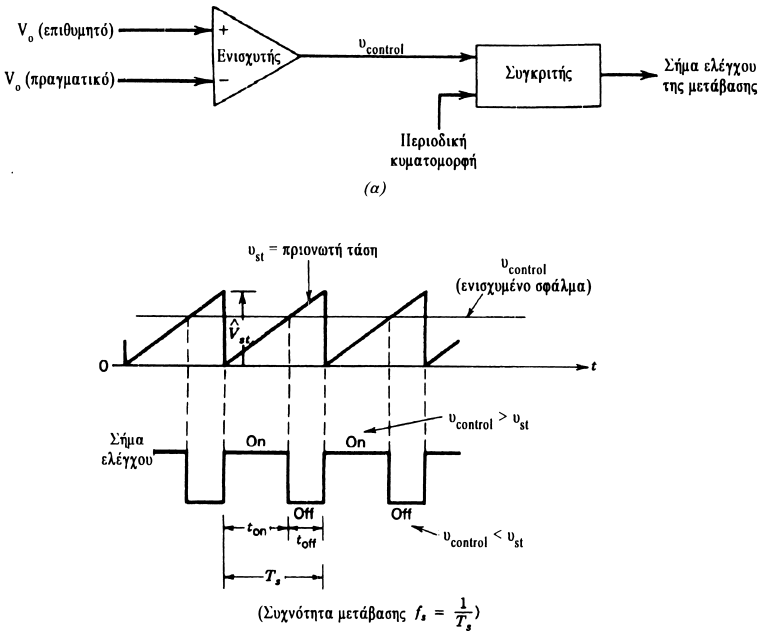
Εικόνα 2.12 **– Μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού τάσης.**

Ο χρόνος μέσα στον οποίο μέσα σε ένα χρονικό διάστημα ο διακόπτης άγει προς το διάστημα αυτό είναι αυτό που καθορίζει και τη μέση τιμή της τάξης εξόδου. Για τον έλεγχο του διακόπτη αυτού χρησιμοποιείται ως επί το πλείστο η τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM).

Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, η μέση τιμή της τάσης εξόδου ελέγχεται ρυθμίζοντας τη σχετική διάρκεια αγωγής του διακοπτικού στοιχείου. Η περίοδος καθώς και η συχνότητα μετάβασης του διακόπτη είναι σταθερά, ενώ αυτό που μεταβάλλεται είναι η σχετική διάρκεια αγωγής αυτού, δηλαδή ο λόγος D=ton/Ts, όπου ton, ο χρόνος αγωγής, toff ο χρόνος σβέσης και Ts=ton+toff, η περίοδος μετάβασης. Η μέση τιμή της τάσης εξόδου είναι τότε:

$$V_0 = \frac{1}{Ts} \cdot \int_0^{Ts} V_0(t)dt = \frac{1}{Ts} \cdot \left(\int_0^{ton} V_d \cdot dt + \int_{ton}^{Ts} 0 \cdot dt \right) = \frac{ton}{Ts} \cdot V_d = D \cdot V_d$$

Το σήμα για πού ελέγχει τη σχετική αυτή διάρκεια αγωγής παράγεται από ένα κύκλωμα συγκριτή, όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



Εικόνα 2.13 **– Κύκλωμα για την παραγωγή του σήματος ελέγχου Vcontrol. Η διαφορά του πλάτους της επιθυμητής τάσης εξόδου μείον την πραγματική τάση εξόδου, ενισχύεται και κατόπιν εισέρχεται σε συγκριτή μαζί με μια πριονωτή κυματομορφή. Όταν το σήμα ελέγχου είναι μεγαλύτερο κατά πλάτος από την πριονωτή τάση, ο διακόπτης άγει για χρόνο ton. Η συνολική περίοδος μετάβασης είναι η περίοδος της πριονωτής τάσης.**

Το σήμα ελέγχου *Vcontrol*, που παράγεται από την ενίσχυση της διαφοράς της επιθυμητής τάσης εξόδου από την πραγματική τάση εξόδου, εισέρχεται σε ένα συγκριτή μαζί με μια περιοδική πριονωτή τάση *Vs*. Η συχνότητα της πριονωτής τάσης καθορίζει και τη συχνότητα μετάβασης *Ts* του διακόπτη. Έτσι η σχετική διάρκεια αγωγής μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των δύο αυτών τάσεων ως εξής:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{V_{control}}{V_{tr}}$$

Έτσι η τάση εξόδου του μετατροπέα γίνεται $V_0 = \frac{V_d}{V_{st}} \cdot V_{control} = k \cdot V_{control}$

Μεταβάλλοντας προφανώς το λόγο *ton/Ts*, η τάση εξόδου V_0 μπορεί να ελεγχθεί.

Επανερχόμενοι στο κύκλωμα του μετατροπέα υποβιβασμού και ολοκληρώνοντας στο διάστημα μιας περιόδου έναυσης- σβέσης του διακόπτη θα έχουμε:

$$\int_0^{Ts} VL \cdot dt = \int_o^{ton} VL \cdot dt + \int_{ton}^{Ts} VL \cdot dt = 0,$$

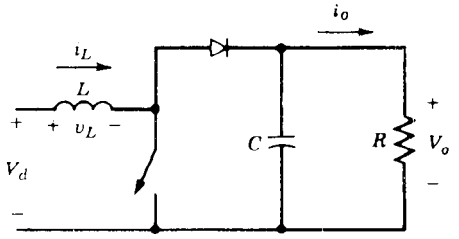
εξίσωση που μεταφράζεται για τις δύο καταστάσεις του διακόπτη ως εξής:

$$(V_d - V_0) \cdot ton = V_0 \cdot (Ts - ton) \Rightarrow$$

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{ton}{Ts} = D \Rightarrow V_0 = D \cdot V_d$$

Από την τελευταία εξίσωση είναι φανερό ότι η τάση εξόδου εξαρτάται αποκλειστικά από το *σχετικό εύρος των παλμών D*, οπότε με την κατάλληλη ρύθμιση αυτού επιτυγχάνεται ο υποβιβασμός στην επιθυμητή τιμή.

• Το αντίστοιχο κύκλωμα για ένα *μετατροπέα ανύψωσης τάσης* φαίνεται παρακάτω. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η δίοδος είναι πολωμένη ανάστροφα, απομονώνοντας τελείως την έξοδο από την είσοδο. Αυτό το διάστημα ενέργεια αποθηκεύεται στο πηνίο. Όταν ο διακόπτης ανοίξει, το φορτίο στην έξοδο του μετατροπέα απορροφά ενέργεια τόσο από την είσοδο όσο και από το πηνίο. Ο πυκνωτής είναι απαραίτητος για την εξομάλυνση της τάσης εξόδου.



Εικόνα 2.14 **– Μετατροπέας DC/DC ανύψωσης τάσης**

Για την μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου στο διάστημα μιας περιόδου ανοιχτού – κλειστού διακόπτη (Ts=ton+toff και D=ton/Ts) ισούται με μηδέν καθώς η ενέργεια που αποθηκεύεται σ' αυτό δεν χάνεται, οπότε έχουμε τις αντίστοιχες εξισώσεις:

$$V_d \cdot t_{on} + (V_d - V_0) \cdot t_{off} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \Rightarrow$$

$$V_0 = \frac{1}{1-D} \cdot V_d$$

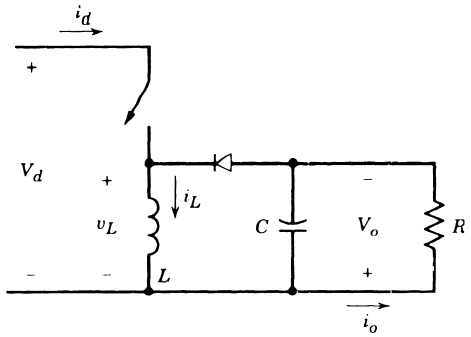
Καθώς ο λόγος D=ton/Ts είναι πάντα μικρότερος της μονάδας, η τάση εξόδου είναι πάντα μεγαλύτερη της τάσης εισόδου V_d.

• Ο *μεικτός DC/DC μετατροπέας* μπορεί να κατασκευαστεί με την εν σειρά σύνδεση των μετατροπέων υποβιβασμού και ανύψωσης, οπότε η συνάρτηση μεταφοράς για την τάση εξόδου θα είναι το γινόμενο αυτών των δύο:

$$\frac{V_0}{V_d} = D \cdot \frac{1}{1-D} \Rightarrow$$

$$V_0 = \frac{D}{1-D} \cdot V_d$$

Ανάλογα με την τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής D, η τάση εξόδου μπορεί να ρυθμίζεται μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση εισόδου. Όπως και στους μετατροπείς από τους οποίους συντίθεται, ο μεικτός μετατροπέας χρησιμοποιεί σαν κύριο αποθηκευτικό μέσο της ενέργειας για μεταβίβαση προς την έξοδο το πηνίο. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός ενέργεια παρέχεται από την είσοδο τόσο στο πηνίο όσο και στο φορτίο εξόδου. Όταν όμως ο διακόπτης ανοίξει, η είσοδος απομονώνεται ενώ η ενέργεια που είχε αποθηκευθεί στο πηνίο μεταφέρεται στην έξοδο. Ο πυκνωτής χρησιμοποιείται κι εδώ για την εξομάλυνση της τάσης εξόδου.

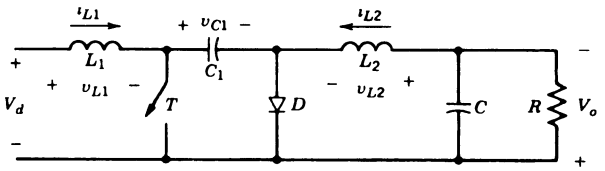


Εικόνα 2.15 **– Μεικτός μετατροπέας DC/DC υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης**

• Εφαρμόζοντας την αρχή της δυαδικότητας στο κύκλωμα του μικτού DC/DC μετατροπέα, προκύπτει ο *μετατροπέας CUK*. Ο μετατροπέας αυτός παρέχει μια σταθεροποιημένη τάση εξόδου με αρνητική πολικότητα σε σχέση με το κοινό της τάσης εισόδου. Το αποθηκευτικό μέσο για την μεταφορά της ενέργειας από την είσοδο στην έξοδο δεν είναι τα πηνία, αλλά ο πυκνωτής C1. Στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας και για διάρκεια μιας περιόδου έναυσης – σβέσης του διακόπτη η μέση τάση τόσο του πρώτου όσο και του δεύτερου πηνίου είναι μηδέν, οπότε έχουμε:

$$V_{C1} = V_d + V_0$$

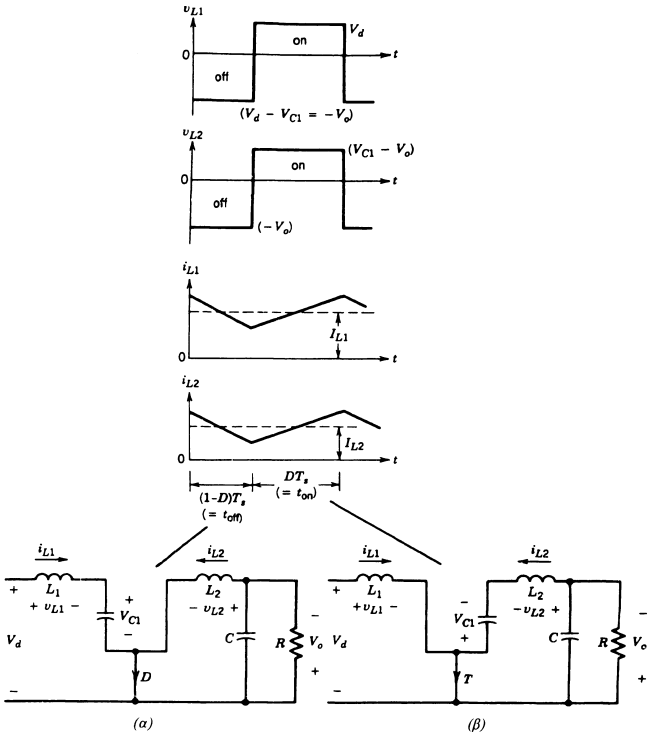
Από την εξίσωση αυτή προκύπτει ότι η τάση V_{C1} είναι μεγαλύτερη και από την τάση εισόδου V_d και από την τάση εξόδου V_0.



Εικόνα 2.16 **– Μετατροπέας του CUK (DC/DC)**

Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός τα ρεύματα των αυτεπαγωγών i_{L1} και i_{L2} ρέουν μέσω της διόδου. Ο πυκνωτής C1 φορτίζεται δια μέσου της διόδου με ενέργεια προερχόμενη τόσο από την είσοδο όσο και από το πηνίο L1. Το ρεύμα i_{L1} μειώνεται καθώς η VC1 είναι μεγαλύτερη από την Vd. Η ενέργεια που αποθηκεύθηκε στο πηνίο L2 τροφοδοτεί το φορτίο εξόδου. Άρα μειώνεται ταυτόχρονα και το ρεύμα i_{L2}.

Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η V_{C1} πολώνει ανάστροφα τη δίοδο. Τα ρεύματα των αυτεπαγωγών i_{L1} και i_{L2} ρέουν μέσω του διακόπτη. Καθώς όμως η τάση του πυκνωτή είναι μεγαλύτερη από την τάση εξόδου, ο πυκνωτής θα αρχίσει να εκφορτίζεται μέσω του διακόπτη, παρέχοντας ενέργεια στην έξοδο αλλά και στο πηνίο L2, με συνέπεια το ρεύμα i_{L2} να αυξάνεται. Ταυτόχρονα όμως από την είσοδο παρέχεται ενέργεια στο πηνίο L1, προκαλώντας αύξηση στο ρεύμα i_{L1}.



Εικόνα 2.17 **– Οι δύο φάσεις του μετατροπέα CUK. α) διακόπτης ανοιχτός, ο πυκνωτής C1 φορτίζεται μέσω της εισόδου και του πηνίου L1. Η έξοδος τροφοδοτείται από το πηνίο L2, β) διακόπτης κλειστός. Η δίοδος πολώνεται ανάστροφα, ο πυκνωτής εκφορτίζεται διαμέσου του διακόπτη, μεταφέροντας ενέργεια στην έξοδο και το πηνίο L2. Το πηνίο L1 φορτίζεται από την είσοδο.**

Θεωρώντας την τάση V_{C1} του πυκνωτή σταθερή, και εξισώνοντας τα ολοκληρώματα των τάσεων στα άκρα των δύο πηνίων με μηδέν (για διάστημα μιας περιόδου):

$$V_d \cdot D \cdot Ts + (V_d - V_{C1}) \cdot (1-D) \cdot Ts = 0 \Rightarrow$$

Για μεν το πηνίο L1:

$$V_{C1} = \frac{1}{1-D} \cdot V_d$$

και για το πηνίο L_2:

$$(V_{C1} - V_0) \cdot D \cdot Ts + (-V_0) \cdot (1-D) \cdot Ts = 0 \Rightarrow$$

$$V_{C1} = \frac{1}{D} \cdot V_0$$

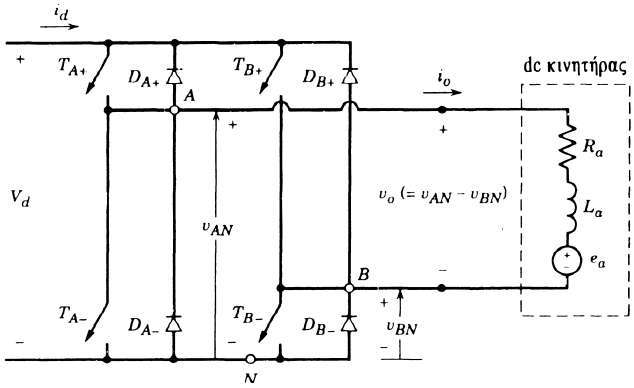
Συνδυάζοντας τις δύο αυτές εξισώσεις προκύπτει για τη σχέση τάσης εισόδου – εξόδου:

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{D}{1-D} \Rightarrow V_0 = \frac{D}{1-D} \cdot V_d$$

Με κατάλληλη επιλογή της σχετικής διάρκειας αγωγής D, είναι δυνατόν ο μετατροπέας CUK να υποβιβάζει ή να ανυψώνει την τάση εισόδου, κατά το κλάσμα D/(1-D).

- Ο *μετατροπέας με πλήρη γέφυρα* χρησιμοποιεί συνολικά τέσσερις διακόπτες και τέσσερις διόδους τοποθετημένες αντιπαράλληλα. Κάθε σκέλος αποτελείται από δύο ζεύγη διακοπτών – διόδων και λειτουργεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε ποτέ την ίδια στιγμή οι διακόπτες του να

μην είναι ταυτόχρονα ανοιχτοί ή κλειστοί. Έτσι για κάθε σκέλος κάθε στιγμή ο ένας διακόπτης είναι ανοιχτός ενώ ο άλλος κλειστός.



Εικόνα 2.18 **– Μετατροπέας DC/DC με πλήρη γέφυρα. Οι διακόπτες T_{A+},T_{B-} και T_{A-},T_{B+} είναι ανοιχτοί ή κλειστοί ταυτόχρονα στην διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου**

Στον μετατροπέα αυτόν η τάση εισόδου έχει καθορισμένη τιμή V_d ενώ η τάση εξόδου V_0, μπορεί να αλλάζει τόσο πλάτος όσο και πολικότητα. Για τον έλεγχο της τάσης εξόδου, χρησιμοποιείται η τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών, όπου η τάση ελέγχου Vcontrol συγκρίνεται αυτή τη φορά με μία τριγωνική κυματομορφή. Δύο παραλλαγές αυτής της τεχνικής χρησιμοποιούνται συνήθως:

- Στην διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου οι διακόπτες T_{A+}, T_{B-} και T_{A-}, T_{B+} αντιμετωπίζονται ως δύο ζεύγη διακοπτών, τα οποία ανοίγουν και κλείνουν ταυτόχρονα.
- Στην διαμόρφωση με μονοπολική τάση εξόδου ο έλεγχος των διακοπτών του κάθε σκέλους γίνεται ανεξάρτητα από το άλλο.

Αντίθετα από τα υπόλοιπα τέσσερα είδη μετατροπέων, ο μετατροπέας με πλήρη γέφυρα έχει την ικανότητα να μεταφέρει ενέργεια αμφίδρομα, καθώς έχει την δυνατότητα να αντιστρέφει την πολικότητα τόσο στην τάση εξόδου V_0, όσο και στο ρεύμα εξόδου I_0.

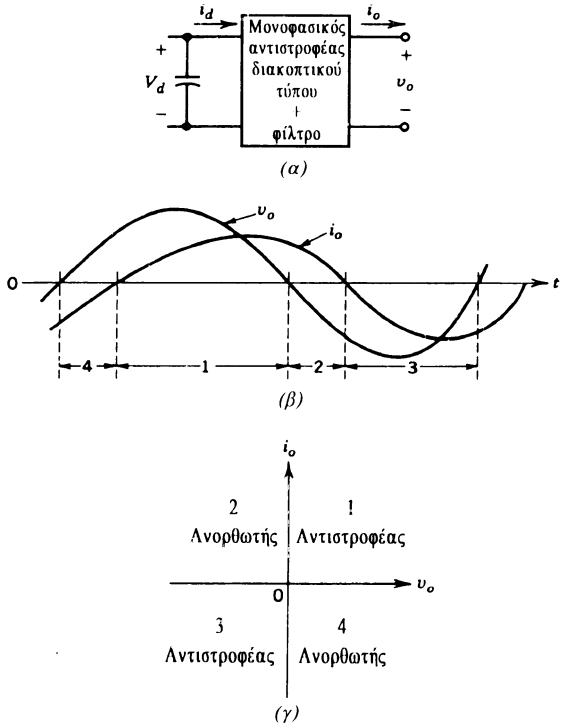
2.3.3 Μονοφασικοί αντιστροφείς DC/AC

Οι αντιστροφείς DC/AC χρησιμοποιούνται σε κινητήρια συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος, σε τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας και στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στα τελευταία η λειτουργία τους είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσεως διαφόρων πηγών και αποθηκευτικών μέσων ενέργειας, σε εναλλασσόμενη (ημιτονοειδή) στην τάση και συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου.

Οι αντιστροφείς DC/AC μπορεί να είναι είτε μονοφασικοί είτε τριφασικοί. Όταν η είσοδος είναι μια πηγή τάσης, αυτοί ονομάζονται αντιστροφείς πηγής τάσης (VSI) ενώ όταν ως είσοδος λαμβάνεται μια πηγή έντασης ονομάζονται αντιστροφείς πηγής έντασης (CSI). Διάφορες τεχνικές ελέγχου, υλοποιούν διαφορετικές κυματομορφές εξόδου της εναλλασσόμενης τάσης, στην εργασία όμως αυτή θα εστιάσουμε το ενδιαφέρον στους μονοφασικούς αντιστροφείς με έλεγχο PWM, παρόμοια μέθοδο με αυτή που εξετάστηκε και στους αντιστροφείς DC/AC. Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται η παραγωγή μιας ημιτονοειδούς κυματορφής εξόδου η οποία μπορεί να ελεγχθεί τόσο κατά πλάτος όσο και κατά συχνότητα, και είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο στα συστήματα σύνδεσης πηγών ΑΠΕ και δικτύου χαμηλής τάσης.

Ένας μονοφασικός αντιστροφέας DC/AC που λειτουργεί με συντελεστή ισχύος διαφορετικό της μονάδας, πρέπει να έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί τόσο ως αντιστροφέας

όσο και ως ανορθωτής, δηλαδή να επιτρέπει τη ροή ενέργειας και προς τις δύο κατευθύνσεις. Αυτό γίνεται κατανοητό με το εξής παράδειγμα:



Εικόνα 2.19 **– Μονοφασικός αντιστροφέας διακοπτικού τύπου με αμφίδρομη ροή ισχύος. Το γινόμενο των V_0,I_0 τάσεως και ρεύματος εξόδου του αντίστοιχα, καθορίζει την λειτουργία του αντιστροφέα και την κατεύθυνση της ροής της ισχύος.**

Έστω ένας αντιστροφέας που τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο, δηλαδή η ένταση που αυτό απορροφά υστερεί της τάσης. Ενώ κατά τα διαστήματα 1 και 3 που φαίνονται στο σχήμα το γινόμενο V_0*I_0 είναι θετικό, δηλαδή η ισχύς ρέει προς το φορτίο, στα διαστήματα 2 και 4 το γινόμενο αυτό είναι αρνητικό, πράγμα που σημαίνει ότι η ισχύς ρέει προς την είσοδο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μια διάταξη πλήρους γέφυρας η οποία αποτελείται από 4 ζεύγη διακοπτών και διόδων, όπως και στους μετατροπείς DC/DC πλήρους γέφυρας.

Για την παραγωγή της ημιτονοειδούς τάσης εξόδου με την μέθοδο της διαμόρφωσης εύρους παλμών χρησιμοποιείται η εξής τεχνική:

Μια τριγωνική κυματομορφή πλάτους *Vtri* συγκρίνεται με μια ημιτονοειδή κυματομορφή, η οποία είναι και η κυματομορφή ελέγχου *Vcontrol*. Η συχνότητα ***fs*** της τριγωνικής κυματομορφής ονομάζεται **φέρουσα συχνότητα** (ή συχνότητα μετάβασης), και είναι αυτή που καθορίζει την συχνότητα με την οποία αλλάζουν κατάσταση οι διακόπτες του αντιστροφέα. Το σήμα ελέγχου *Vcontrol* χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της σχετικής διάρκειας αγωγής των διακοπτών και έχει συχνότητα f_1. Αυτή ονομάζεται **συχνότητα διαμόρφωσης** και είναι η επιθυμητή θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Η παραγόμενη αυτή τάση, δεν είναι τέλεια ημιτονοειδής, αλλά περιέχει και αρμονικές συνιστώσες της συχνότητας διαμόρφωσης f_1.

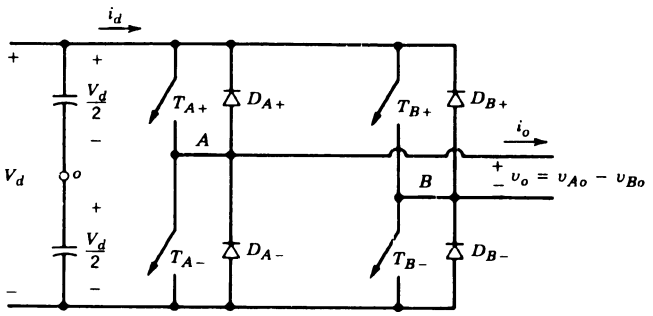
Από τον λόγο της φέρουσας συχνότητας προς τη συχνότητα διαμόρφωσης προκύπτει ο **συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας** m_f:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1}$$

Ομοίως ορίζεται και ο **συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους** ως ο λόγος του πλάτους του σήματος ελέγχου προς το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής:

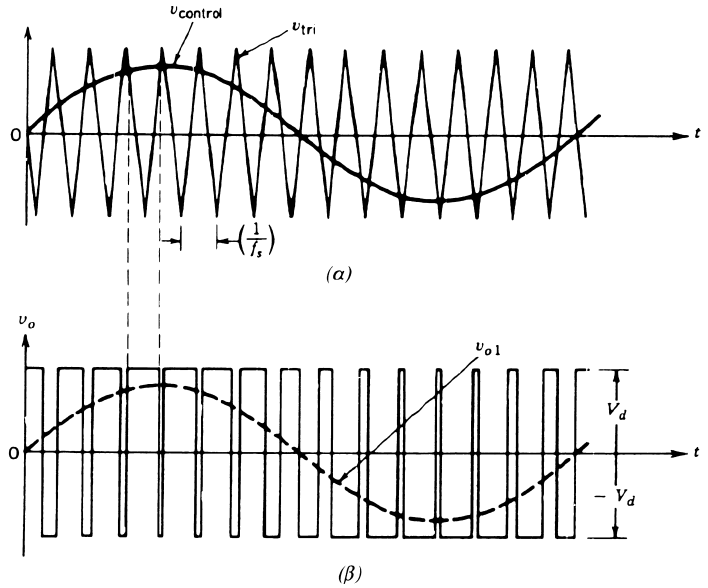
$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}}$$

Στην διαμόρφωση PWM για τους μονοφασικούς αντιστροφείς η μετατροπή της DC τάσης μπορεί να γίνεται είτε από μισή γέφυρα (2 ζεύγη διακοπτών – διόδων) είτε από πλήρη γέφυρα (4 ζεύγη διακοπτών – διόδων), που είναι και η συνηθέστερη περίπτωση για αντιστροφείς ισχύος. Η διαμόρφωση μπορεί να γίνεται είτε με διπολική είτε με μονοπολική τάση εξόδου.



Εικόνα 2.20 **– Αντιστροφέας DC/AC με πλήρη γέφυρα. Κατά τη διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου οι διακόπτες T_{A+},T_{B-} και T_{A-},T_{B+} λειτουργούν ως ζεύγη.**

- *Διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου:* Τα ζεύγη διακοπτών T_{A+},T_{B-} και T_{A-},T_{B+} αλλάζουν κατάσταση ως ζεύγη διακοπτών 1 και 2 αντίστοιχα. Τα δύο ζεύγη διακοπτών αυτά ελέγχονται με βάση τη σύγκριση των κυματομορφών *Vcontrol* και *Vtri*, και ανεξάρτητα από τη φορά του ρεύματος εξόδου i_0, προκύπτει τάση εξόδου:
  - $V_0 = Vd$, όταν *Vcontrol>Vtri* οπότε οι (T_{A+},T_{B-}) άγουν
  - $V_0 = -Vd$, όταν *Vcontrol<Vtri*, οπότε οι (T_{A-},T_{B+}) άγουν



Εικόνα 2.21 **– Διαμόρφωση εύρους παλμών με διπολική τάση εξόδου στον αντιστροφέα DC/AC ημιτονοειδούς εξόδου. Το σήμα ελέγχου Vcontrol συγκρίνεται με μία τριγωνική κυματομορφή. Η έξοδος προκύπτει +Vd για Vcontrol>Vtri, και –Vd για Vcontrol<Vtri. Η τριγωνική κυματομορφή καθορίζει την φέρουσα συχνότητα, ενώ η κυματομορφή ελέγχου την συχνότητα διαμόρφωσης (συχνότητα εξόδου).**

Έτσι, η μέση τάση εξόδου V_0 στο διάστημα μιας περιόδου μετάβασης αγωγής – αποκοπής (Ts=1/fs) για τάση εισόδου V_d, και για κυματομορφή ελέγχου $V_{control} \leq V_d$, θα είναι:

$$V_0 = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \cdot V_d = m_a \cdot V_d$$

Για διάφορες τιμές των συντελεστών διαμόρφωσης συχνότητας και πλάτους m_f και m_a αντίστοιχα, διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

- m_f<21: Συγχρονισμένη διαμόρφωση. Στην περίπτωση μικρού συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας, τα δύο σήματα Vcontrol και Vtri πρέπει να είναι συγχρονισμένα μεταξύ τους, πράγμα που με τη σειρά του απαιτεί ακέραια τιμή του m_f. Μάλιστα αυτός πρέπει να είναι περιττός ακέραιος καθώς αυτό έχει ως αποτέλεσμα περιττή συμμετρία στην συνάρτηση εξόδου. Περιττή συμμετρία σημαίνει ότι υπάρχουν μόνο περιττές αρμονικές σ' αυτή.
- m_f>21: Ασύγχρονη διαμόρφωση: Στην περίπτωση αυτή, η μεν συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής διατηρείται σταθερή, ενώ η συχνότητα του σήματος ελέγχου μεταβάλλεται, έχοντας ως αποτέλεσμα μη ακέραιες τιμές του συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας.
- m_a>1: Στην θεώρηση που έγινε θεωρήθηκε δεδομένο ότι το πλάτος του σήματος ελέγχου είναι μικρότερο ή ίσο από το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής, οπότε η τάση εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με το συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους. Στην περίπτωση αυτή, οι αρμονικές της τάσης εξόδου εμφανίζονται σε μια περιοχή υψηλών συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα μετάβασης fs και τις πολλαπλάσιες αυτής. Όταν ο συντελεστής m_a είναι μεγαλύτερος της μονάδας έχουμε υπερδιαμόρφωση, με αποτέλεσμα η τάση εξόδου V_0 να περιέχει περισσότερες αρμονικές στις πλευρικές ζώνες σε σύγκριση με τη γραμμική περιοχή. Για μεγάλες τιμές του λόγου m_a, η κυματομορφή εξόδου του αντιστροφέα εκφυλίζεται σε τετραγωνική. Τότε η τάση εξόδου λαμβάνει τιμές:

$$V_d < V_0 < \frac{4}{\pi} \cdot V_d$$

- *Διαμόρφωση με μονοπολική τάση εξόδου*: Κατά τη μέθοδο αυτή οι διακόπτες στα δύο σκέλη του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας δεν αλλάζουν κατάσταση ταυτόχρονα. Το σκέλος Α ελέγχεται με σύγκριση της τάσης *Vtri* με την *Vcontrol*, ενώ οι διακόπτες του σκέλους Β ελέγχονται με τη σύγκριση των κυματομορφών *Vtri* και -*Vcontrol*. Έτσι για το σκέλος Α, θα έχουμε:

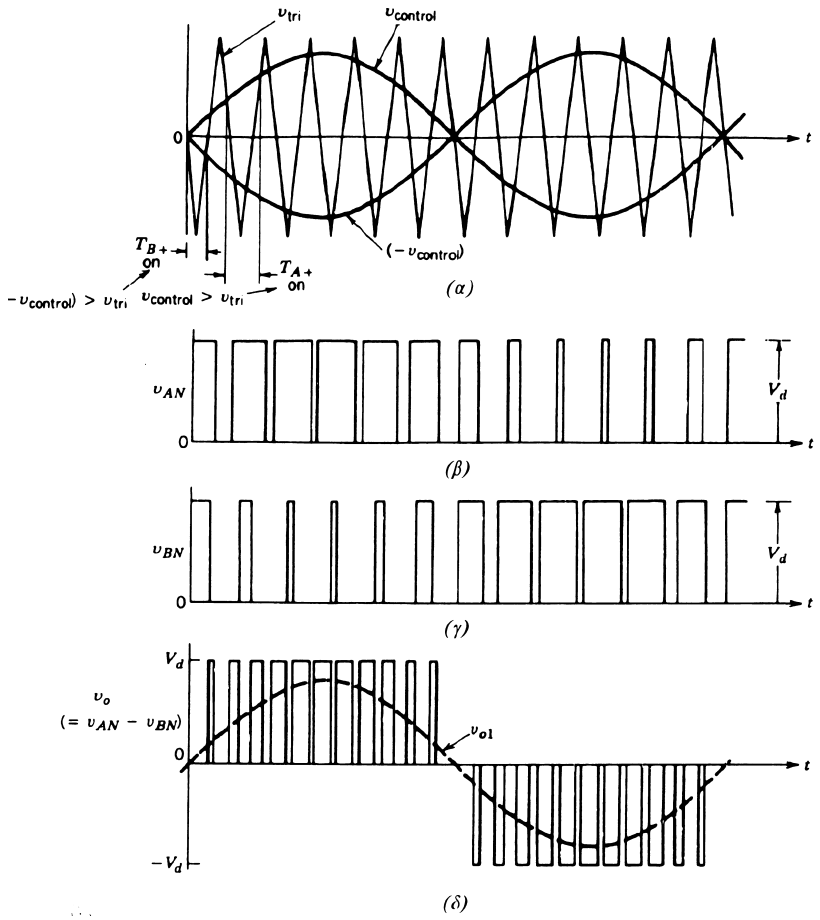
$$Vcontrol > Vtri : T_{A+}\, on, \kappa\alpha\iota, V_{AN} = V_d$$
$$Vcontrol < Vtri : T_{A-}\, on, \kappa\alpha\iota., V_{AN} = 0$$

και για το σκέλος Β:

$$-(Vcontrol) > Vtri : T_{B+}\, on, \kappa\alpha\iota, V_{BN} = V_d$$
$$-(Vcontrol) < Vtri : T_{B-}\, on, \kappa\alpha\iota., V_{BN} = 0$$

Τέσσερις δυνατοί συνδυασμοί κλειστών διακόπτων υπάρχουν δίνοντας τα εξής επίπεδα τάσης εξόδου:

- $T_{A+}, T_{B-}, \kappa\lambda\epsilon\iota\sigma\tau o\acute{\iota} : U_{AN} = V_d, U_{BN} = 0, U_0 = V_d$
- $T_{A-}, T_{B+}, \kappa\lambda\epsilon\iota\sigma\tau o\acute{\iota} : U_{AN} = 0, U_{BN} = V_d, U_0 = -V_d$
- $T_{A+}, T_{B+}, \kappa\lambda\epsilon\iota\sigma\tau o\acute{\iota} : U_{AN} = V_d, U_{BN} = V_d, U_0 = 0$
- $T_{A-}, T_{B-}, \kappa\lambda\epsilon\iota\sigma\tau o\acute{\iota} : U_{AN} = 0, U_{BN} = 0, U_0 = 0$



Εικόνα 2.22 – Διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου

Με τη μέθοδο αυτή, τα άλματα της τάσης εξόδου μειώνονται σε V_d (από $2V_d$ στη διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου), ενώ διπλασιάζεται η συχνότητα μετάβασης όσον αφορά τις αρμονικές εξόδου. Κάτι τέτοιο είναι επιθυμητό, καθώς οι χαμηλότερες αρμονικές εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες σε συχνότητα διπλάσια της θεμελιώδους. Εάν επιλεγεί άρτιος συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας m_f, οι κυματομορφές της τάσης U_{AN} και U_{BN} μετατοπίζονται κατά 180^0 από τη θεμελιώδη συχνότητα f_1, η μια σε σχέση με την άλλη. Οι αρμονικοί όροι στη συχνότητα μετάβασης στις U_{AN} και U_{BN} έχουν την ίδια φάση, με αποτέλεσμα να απαλείφεται ο αρμονικός όρος στη συχνότητα μετάβασης στην τάση εξόδου $U_0=U_{AN}-U_{BN}$. Το ίδιο εξαλείφονται και οι πλευρικές ζώνες των αρμονικών της συχνότητας μετάβασης.

Για λόγο:

$$m_a \le 1 \text{, έχουμε ότι } V_{01} = m_a \cdot V_d$$

$$m_a > 1 \text{, έχουμε ότι } V_d < V_{01} < \frac{4}{\pi} Vd$$

2.3.4 Ηλεκτρική απομόνωση των μετατροπέων ισχύος

Πιο πάνω περιγράφηκαν οι βασικές θεωρητικές τοπολογίες με τις οποίες γίνεται η μετατροπή μιας συνεχούς τάσης εισόδου σε ημιτονική τάση εξόδου, ελεγχόμενη κατά πλάτος και συχνότητα. Διάφορες εφαρμογές απαιτούν είτε την ύπαρξη μόνό μιας γέφυρας DC/AC, για την μετατροπή της εισερχόμενης τάσης κατευθείαν σε εναλλασσόμενη, είτε την μετατροπή της (μη σταθερής) DC εισερχόμενης τάσης σε μια στάθμη σταθερής τιμής και στη συνέχεια την μετατροπή αυτής σε εναλλασσόμενη.

Ένας αντιστροφέας ωστόσο δεν περιλαμβάνει μόνο τις διατάξεις που επιτυγχάνουν αυτή τη μετατροπή, αλλά και σειρά άλλων που αφορούν τον έλεγχο, την προστασία και την βελτίωση της ποιότητας της παραγόμενης τάσης.

Ασφάλειες, αυτόματοι διακόπτες, και κυκλώματα εντοπισμού υπερτάσεων αποτελούν διατάξεις προστασίας του αντιστροφέα. Φίλτρα πηνίων και πυκνωτών χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση των ρευμάτων εισόδου και εξόδου.

Πολύ σημαντική είναι και η παρεμβολή ενός μετασχηματιστή, έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης ηλεκτρική απομόνωση της πλευράς εισόδου από την έξοδο. Ένας μετασχηματιστής απομόνωσης χαμηλής συχνότητας μπορεί να τοποθετείται κατευθείαν στο στάδιο εξόδου, οπότε η παραγόμενη ημιτονική κυματομορφή οδηγείται μέσω αυτού στο κύκλωμα της εναλλασσόμενης τάσης (π.χ. ηλεκτρικό δίκτυο πόλης).

Μεγάλη συζήτηση διεξάγεται σχετικά με το αν είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός μετασχηματιστή απομόνωσης, σε αντιστροφείς που συνδέονται με το κεντρικό δίκτυο. Κανονισμοί μερικών χωρών καθιστούν υποχρεωτική την ύπαρξη αυτού στους αντιστροφείς που συνδέονται στο δίκτυο τους. Για την Αγγλία το όριο του επιτρεπόμενου DC ρεύματος που παράγουν οι αντιστροφείς είναι 5mA (0,025% του ονομαστικού ρεύματος εξόδου), ενώ για τα δίκτυα της Αμερικής αυτό είναι 0,5% του ρεύματος αυτού.

Είναι πολύ πιθανό όταν δεν υπάρχει μετασχηματιστής απομόνωσης, είτε σε κανονική λειτουργία, είτε πολύ περισσότερο σε περιπτώσεις σφάλματος, ο αντιστροφέας να εισάγει μια DC συνιστώσα ρεύματος στην ημιτονική κυματομορφή εξόδου του, κάτι εντελώς ανεπιθύμητο για το ηλεκτρικό δίκτυο και τις συσκευές που βρίσκονται κοντά, προκαλώντας υπερθέρμανση στα τυλίγματα κινητήρων και μετασχηματιστών ή παρεμβολές σε άλλες συσκευές. Η παρεμβολή αυτού του μετασχηματιστή λειτουργεί ως ένα αδιαπέραστο φίλτρο τυχόν DC ρευμάτων. Η ύπαρξη μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας, επιτρέπει απόδοση του αντιστροφέα μέχρι 92%.

Μια διαφορετική τοπολογία που επιτρέπει την γαλβανική απομόνωση της DC από την AC πλευρά, είναι η τοποθέτηση μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας πριν τη γέφυρα παραγωγής της ημιτονοειδούς τάσης. Κατά τη διάταξη αυτή, η εισερχόμενη DC τάση εισέρχεται σε μια διάταξη DC/DC μετατροπέα η οποία και λειτουργεί με υψηλή διακοπτική συχνότητα. Η συνεχής τάση εισόδου μετατρέπεται με γέφυρα διακοπτών σε τάση υψηλής συχνότητας και έπειτα ανορθώνεται ώστε να μετατραπεί σε DC τάση ελεγχόμενου πλάτους. Στο ενδιάμεσο στάδιο του μετατροπέα αυτού, είναι δυνατόν να παρεμβληθεί ο υψίσυχνος μετασχηματιστής.

Έτσι πάλι επιτυγχάνεται απομόνωση της εισόδου από την έξοδο του αντιστροφέα, η οποία ωστόσο πάλι είναι πιθανό να μην αποκλείει την ενδεχόμενη έγχυση DC ρεύματος, από το μετέπειτα στάδιο της PWM γέφυρας DC/AC, στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ωστόσο με την τοπολογία αυτή επιτυγχάνονται αποδόσεις λίγο μεγαλύτερες (της τάξης του 94%), καθώς ο μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας, λόγω της ισχυρής μαγνητικής του σύζευξης, έχει μικρότερες απώλειες απ' ότι ένας που λειτουργεί στα 50Hz. Παράλληλα μειώνονται ο όγκος, το βάρος και το κόστος του μετασχηματιστή εν συγκρίσει με αυτά ενός χαμηλής συχνότητας.

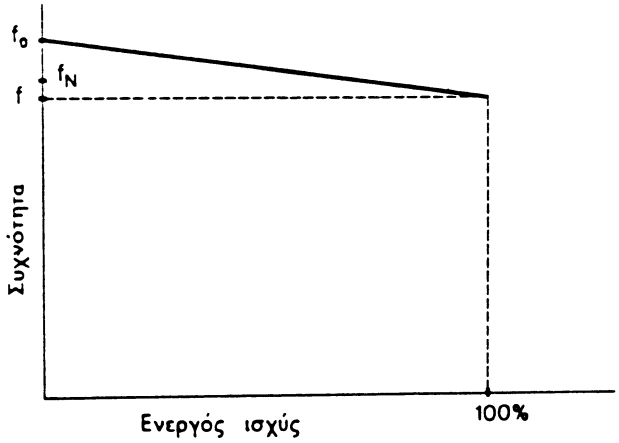
2.3.5 Έλεγχος τάσης και συχνότητας αντιστροφέων

Σε ότι αφορά το στάδιο εξόδου των αντιστροφέων ισχύος, αυτό που είναι καθοριστικής σημασίας είναι τι ακριβώς διασύνδεση έχει με το κύκλωμα εξόδου. Όταν ο αντιστροφέας απλά τροφοδοτεί φορτία χωρίς την ύπαρξη άλλων πηγών, η λογική ελέγχου είναι σχετικά απλή. Ο αντιστροφέας, μέσω αναδραστικών κυκλωμάτων ελέγχου, προσπαθεί να παράγει ημιτονοειδή κυματομορφή, στην ονομαστική τάση και συχνότητα που έχει καθοριστεί να λειτουργεί. Και αυτό διότι με την μεταβολή των φορτίων η τάση και η συχνότητα μπορεί να μεταβάλλονται.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται αντιστροφείς DC/AC, οι οποίοι συνδέονται με ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Διαφέρουν από τους κοινούς αντιστροφείς, οι οποίοι απλά παράγουν μια ημιτονοειδή τάση εξόδου, στο ότι έχουν την δυνατότητα να συγχρονίζονται με μια υπάρχουσα κυματομορφή που εντοπίζουν στην έξοδό τους. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα βρόχο κλειδώματος φάσης (phase locked loop), σύμφωνα με τον οποίο το κύκλωμα ελέγχου του αντιστροφέα, μετρά τη διαφορά φάσης μεταξύ της παραγόμενης από αυτόν τάσης και της ήδη υπάρχουσας. Ολισθαίνοντας κατάλληλα την φάση της τάσης που παράγει, μέσω αλλαγής της συχνότητας, μηδενίζει την διαφορά αυτή, οπότε και η σύνδεση γίνεται ομαλά.

Ένας αντιστροφέας που έχει φτιαχτεί για να παρέχει μόνο ισχύς στο δίκτυο (π.χ. αντιστροφείς φωτοβολταϊκών) λειτουργεί με συντελεστή ισχύος μονάδα και ουσιαστικά αποδίδει ενεργό ισχύ. Αντίθετα, ένας αντιστροφέας με δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος, χρειάζεται διαφορετικές τεχνικές ελέγχου ροής της ισχύος. Μερικά στοιχεία για την λειτουργία των ηλεκτρικών δικτύων είναι απαραίτητα, για να γίνει κατανοητός ο πρωτότυπος τρόπος σύνδεσης του ενός απ' τους δύο αντιστροφείς που εξετάζονται παρακάτω με το δίκτυο.

Πηγή κάθε μεγάλου ηλεκτρικού δικτύου είναι η σύγχρονη γεννήτρια, οι ιδιότητες της οποίας καθορίζουν βασικά την συμπεριφορά του δικτύου στις μεταβολές της τάσης και της συχνότητας. Για αυτήν, η συχνότητα της τάσεως εξόδου είναι αντιστρόφως ανάλογη της ενεργού ισχύος εξόδου αυτής. Ομοίως η τάση εξόδου αυτής είναι αντιστρόφως ανάλογη της αέργου ισχύος εξόδου. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η μεταβολή των μεγεθών f,V συναρτήσει της ενεργού P και αέργου Q ισχύος αντίστοιχα. Ένα δίκτυο που περιλαμβάνει περισσότερες από μια γεννήτριες μπορεί να χρησιμοποιεί κάποιες από αυτές για την παραγωγή μιας σταθερής ισχύος (γεννήτριες βάσης) ενώ κάποιες άλλες για τη ρύθμιση των f,V (ρυθμίζουσες γεννήτριες).



Εικόνα 2.24 – **Χαρακτηριστική φορτίου – συχνότητας σύγχρονης γεννήτριας (στατισμός)**

Ονομάζοντας ως f_0 την συχνότητα λειτουργίας σε κενό φορτίο, f_N την ονομαστική συχνότητα του δικτύου, ο στατισμός της γεννήτριας ορίζεται ως

$$R_\mu = -\frac{f_0 - f}{f_N}$$

Ο διαφορικός στατισμός ορίζεται ως

$$R_\delta = -\frac{\Delta f / f_N}{\Delta P / P_N}$$

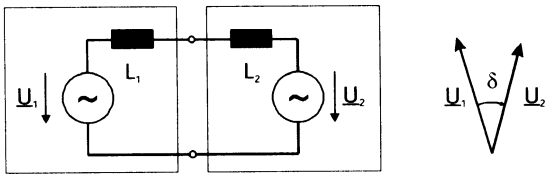
Σύμφωνα με την κλίση αυτής της χαρακτηριστικής εξίσωσης η γεννήτρια ανταποκρίνεται στις μεταβολές της ενεργού ισχύος του δικτύου μεταβάλλοντας την συχνότητά της. Όταν η γεννήτρια αυξάνει την ενεργό ισχύ εξόδου της, υπάρχει η τάση να μειωθούν οι στροφές περιστροφής της, οπότε μειώνεται και η συχνότητα εξόδου. Η σχέση μεταξύ συχνότητας και ταχύτητας περιστροφής εξάγεται άμεσα από την βασική εξίσωση της σύγχρονης γεννήτριας:

$$f = \frac{P \cdot n}{120},$$

όπου: f, η συχνότητα της τάσης εξόδου
n, ο αριθμός στροφών της γεννήτριας
P, ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας

Αντίθετα, μείωση της παρεχόμενης ενεργού ισχύος προκαλεί αύξηση της συχνότητας εξόδου της γεννήτριας. Το κύκλωμα ελέγχου της γεννήτριας αλλάζει είτε την ονομαστική συχνότητα λειτουργίας, είτε την συχνότητα κενού φορτίου (μετατόπιση της χαρακτηριστικής προς τα πάνω ή τα κάτω) είτε την κλίση της χαρακτηριστικής αυτής, προκειμένου να ανταποκριθεί στις μεταβολές του φορτίου ή της συχνότητας. Το είδος της ρύθμισης εξαρτάται από το αν είναι επιθυμητή η τήρηση σταθερής της συχνότητας ή του φορτίου.

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται για τον έλεγχο της τάσης. Η ρυθμίζουσα γεννήτρια, μεταβάλλοντας την άεργο ισχύ μπορεί να ελέγχει την τάση του δικτύου. Με μία αρνητική κλίση τάσεως – αέργου ισχύος, αύξηση της αέργου ισχύος θα προκαλέσει μείωση της τάσεως εξόδου, αντίθετα μείωση της άεργου ισχύος αυξάνει την τάση εξόδου. Ενώ η κλίση του στατισμού της συχνότητας είναι πάντα αρνητική για την σύγχρονη γεννήτρια, δεν συμβαίνει το ίδιο και με την κλίση του στατισμού της τάσης. Ανάλογα με το κύκλωμα ελέγχου που υλοποιείται, μπορεί να λειτουργεί είτε με θετική είτε με αρνητική κλίση τάσεως – αέργου ισχύος. Ένα τέτοιο κύκλωμα μεταβάλλει την διέγερση της σύγχρονης γεννήτριας, δηλαδή το συνεχές ρεύμα που παράγει το μαγνητικό πεδίο. Όταν η γεννήτρια λειτουργεί με υπερδιέγερση, παράγει άεργο ισχύ, ενώ όταν λειτουργεί με υποδιέγερση απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο. Για την διευκόλυνση της ανάλυσης θεωρούμε ένα απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα δύο γεννητριών σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο.



Εικόνα 2.25 **– Ισοδύναμο κύκλωμα δύο γεννητριών που συνδέονται μέσω επαγωγών L1, L2. Η διαφορά φάσης μεταξύ των διανυσμάτων των τάσεων δ, προκαλεί ροή ενεργού ισχύος, ενώ η διαφορά στα πλάτη, ροή αέργου ισχύος**

Εάν οι γεννήτριες συνδέονται μέσω των επαγωγών L1,L2 και η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο τάσεων είναι δ, τότε η ενεργός ισχύς που ρέει στο δίκτυο είναι

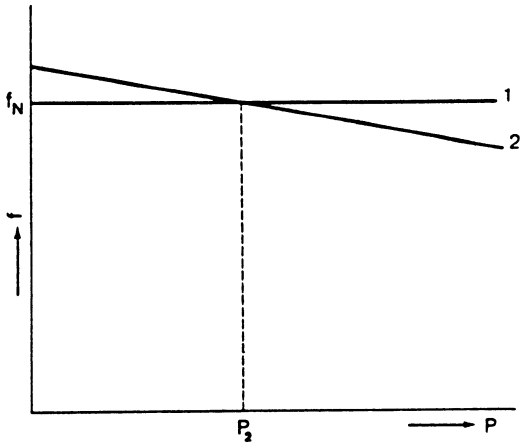
$$P = \frac{V1 \cdot V2}{\omega \cdot (L1 + L2)} \cdot \sin(\delta)$$

και η άεργος

$$Q = \frac{V1^2}{\omega \cdot (L1 + L2)} - \frac{V1 \cdot V2}{\omega \cdot (L1 + L2)} \cdot \cos(\delta)$$

Από την εξίσωση της ενεργού ισχύος είναι εμφανές ότι αυτό που προκαλεί ροή ενεργού ισχύος μεταξύ των δύο γεννητριών είναι η ύπαρξη διαφοράς φάσης δ. Απ' την άλλη, ροή αέργου ισχύος υπάρχει όταν υπάρχει διαφορά στο μέτρο των τάσεων των δύο γεννητριών.

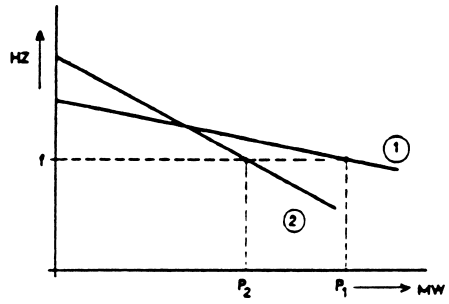
Από τις δύο αυτές γεννήτριες η μία μπορεί να λειτουργεί ως βασική ενώ η άλλη ως ρυθμίζουσα. Για την ρυθμίζουσα ο στατισμός είναι μηδενικός, οπότε η ενεργός και η άεργος ισχύς από αυτήν δεν μεταβάλλονται με τις αλλαγές στην τάση και στην συχνότητα του δικτύου.



Εικόνα 2.26 **– Επίπεδος έλεγχος συχνότητας μεταξύ δύο γεννητριών. Η γεννήτρια 1 (ρυθμίζουσα μονάδα) με μηδενικό στατισμό απορροφά όλες τις διακυμάνσεις του φορτίου, φροντίζοντας για την σταθερότητα της συχνότητας στη τιμή f_N, ενώ η γεννήτρια 2, που έχει στατισμό, παράγει σταθερή ενεργό ισχύ.**

Οι δύο γεννήτριες τροφοδοτούν το κοινό δίκτυο με ισχύ στην ονομαστική πάντα συχνότητα f_N. Καθώς η συχνότητα μένει σταθερή, η γεννήτρια 2 που έχει στατισμό, αναγκάζεται να δίνει πάντα σταθερή ισχύ P2, όπως προκύπτει από το σημείο τομής των δύο ευθειών. Συνεπώς όλες τις διακυμάνσεις στο φορτίο τις απορροφά η γεννήτρια με τον μηδενικό στατισμό, κρατώντας τη συχνότητα συνεχώς στην ονομαστική της τιμή.

Εάν και οι δύο γεννήτριες έχουν οριστεί ως ρυθμίζουσες, ο έλεγχος θα μπορούσε να γίνει και από τις δύο, ανάλογα με τις κλίσεις P-f, Q-V που έχουν ορισθεί για την κάθε μια. Εάν οι κλίσεις των δύο γεννητριών είναι διαφορετικές, η ροή ισχύος από την κάθε γεννήτρια, προκύπτει από την τομή της τιμής της συχνότητας του δικτύου την στιγμή εκείνη (οριζόντια διακεκομμένη γραμμή) με την κάθε μια κλίση στατισμού.



Εικόνα 2.27 – **Παράλληλη λειτουργία δύο γεννητριών με στατισμό. Το κοινό δίκτυο λειτουργεί με συχνότητα f. Φέρνοντας την παράλληλη του σημείου f, προς τον άξονα των χ, η ευθεία συναντά σε διαφορετικά σημεία τις δύο διαφορετικές κλίσεις στατισμού. Το συνολικό φορτίο που απορροφάται προκύπτει ως άθροισμα της συμβολής της κάθε γεννήτριας $P=P_1+P_2$**

Εξετάζοντας τώρα την περίπτωση σύνδεσης μικρών αντιστροφέων ισχύος με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, θα λέγαμε ότι στην πράξη, το τελευταίο φαίνεται στον αντιστροφέα σαν μια γεννήτρια σταθερής τάσης και συχνότητας, ικανή να δίνει η να απορροφά όση ισχύ επιτρέπουν οι ασφάλειες της γραμμής χαμηλής τάσης. Είναι προφανές ότι το δίκτυο είναι αυτό που επιβάλλει τα δύο αυτά μεγέθη στην διασυνδεδεμένη λειτουργία με τον αντιστροφέα. Η ροή ενεργού ισχύος, καθορίζεται κάθε στιγμή από τη διαφορά φάσης μεταξύ των τάσεων των δύο πηγών, ενώ ροή άεργου ισχύος προκαλείται από τη διαφορά στο πλάτος της τάσης. ***Συνεπώς ένας αντιστροφέας ελέγχει την ενεργό και άεργο ισχύ που ανταλλάσσει με το δίκτυο, είτε ρυθμίζοντας την συχνότητα (διαφορά φάσης δ με το δίκτυο) και το πλάτος της τάσης εξόδου του αντίστοιχα, είτε, δευτερευόντως, αλλάζοντας την κλίση των χαρακτηριστικών καμπύλων στατισμού αυτού.***

Την περίπτωση όμως δύο ρυθμίζουσων γεννητριών μπορεί να έχουμε όταν διασυνδέονται δύο αντιστροφείς σε ένα απομονωμένο δίκτυο (island grid). Και εδώ, η ροή ισχύος μεταξύ των δύο αντιστροφέων προκαλείται από τη διαφορά φάσης στα διανύσματα της τάσης (συχνότητα) καθώς και του μέτρου αυτών. Μια τυπική μέθοδος συνεργασίας μεταξύ των δύο μονάδων είναι να ρυθμιστεί η μία ως βασική (ρυθμίζουσα) και η άλλη ως δευτερεύουσα. Αυτό μπορεί να γίνει με καλώδια επικοινωνιών ελέγχου μεταξύ των δύο αντιστροφέων.

Ωστόσο, ο έλεγχος των δύο αντιστροφέων θα μπορούσε να γίνει κατευθείαν μέσω των μεγεθών της διαφοράς φάσης και συχνότητας, χωρίς να απαιτείται κάποιος ιδιαίτερος τρόπος επικοινωνίας των μικροεπεξεργαστών τους. Η περίπτωση αυτή είναι δυνατή, αν οι δύο αντιστροφείς συμπεριφέρονται όπως οι σύγχρονες γεννήτριες. Προφανές είναι ότι ένας αντιστροφέας δεν διαθέτει στατισμό, αυτός είναι χαρακτηριστικό μιας σύγχρονης γεννήτριας που προέρχεται από τη δομή της ηλεκτρικής της λειτουργίας, ωστόσο προσομοίωση του στατισμού μπορεί να γίνει μέσω μικροεπεξεργαστή. Η ονομαστική τάση V_N και συχνότητα λειτουργίας f_N είναι μέγεθος που ρυθμίζεται από το χειριστή του συστήματος, καθώς και οι κλίσεις των καμπύλων στατισμού droop(P-f), droop(Q-V). Με βάση αυτές τις τιμές, ο κάθε αντιστροφέας μετρά ξεχωριστά την τάση V και τη συχνότητα f του κοινού δικτύου στους ακροδέκτες του, και ρυθμίζει την ροή της ενεργού και αέργου ισχύος του με βάση τη διαφορά f_N-f και V_N-V αντίστοιχα.

Για την κλίση του στατισμού συχνότητας θα έχουμε:

$$droopf = \frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{(f_N - f)\cdot P_N}{P},$$

όπου ΔP η ενεργός ισχύς του αντιστροφέα ως κλάσμα επί της ονομαστικής του P_N

και αντίστοιχα για την κλίση του στατισμού της τάσεως:

$$droopV = \frac{\Delta V}{\Delta Q} = \frac{(V_N - V)\cdot Q_N}{Q},$$

όπου ΔQ η άεργος ισχύς, ως κλάσμα επί της ονομαστικής του Q_N

Λύνοντας τις εξισώσεις αυτές ως προς P και Q, έχουμε για την ισχύ του κάθε αντιστροφέα:

$$P = \frac{\left(f_N - f\right)\cdot P_N}{droopf}$$

$$Q = \frac{(V_N - V)\cdot Q_N}{droopV}$$

Όπως φαίνεται στο σχήμα, η τομή των δύο κλίσεων με την ευθεία της συχνότητας λειτουργίας f, καθορίζει το ποσοστό της ισχύος που θα δίνει κάθε αντιστροφέας στο κοινό δίκτυο. Για συνολική απορροφούμενη ισχύ από τα φορτία του απομονωμένου δικτύου $P=P_1+P_2$, η κοινή συχνότητα λειτουργίας f βρίσκεται λύνοντας ως προς την μεταβλητή αυτή, την εξίσωση της ισχύος, δηλ.

$$P = \frac{\left(f_{N1} - f\right)\cdot P_{N1}}{droopf_1} + \frac{\left(f_{N2} - f\right)\cdot P_{N2}}{droopf_2}$$

2.3.6 Αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας (Anti-Islanding detection)

Η ραγδαία εξάπλωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αύξησε παράλληλα και τον αριθμό των συστημάτων ΑΠΕ τα οποία συνδέονται με το δίκτυο και ανταλλάσσουν ενέργεια με αυτό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα για την Ελλάδα αποτελεί η Κρήτη με ένα 10% συνολικά παραγόμενης ενέργειας από ανεμογεννήτριες. Σε πολλές χώρες έχει προχωρήσει ευρύτατα και η διείσδυση μικρότερων συστημάτων παραγωγής ενέργειας, όπως αυτό του μικροδικτύου, τα οποία χρησιμοποιούν είτε ηλιακούς συλλέκτες, είτε ανεμογεννήτριες, είτε μικρά υδροηλεκτρικά. Χαρακτηριστικά στην Γερμανία έχουν εγκατασταθεί μέχρι στιγμής 260,6 MWp φωτοβολταϊκών τα οποία παρέχουν ισχύ στο δίκτυο.

Καθώς όμως η ισχύς αυτή είναι αποκεντρωμένη, οι προστασίες του δικτύου ουσιαστικά καθίστανται αδρανείς. Αυτό διότι όπως προαναφέρθηκε τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι δομημένα κάθετα, από την συγκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προς την διανεμημένη κατανάλωση. Σε περίπτωση αποσύνδεσης ενός μεγάλου εργοστασίου παραγωγής ενέργειας, υπάρχει η πιθανότητα οι γεννήτριες διανεμημένης παραγωγής να συνεχίσουν να παρέχουν ισχύ. Ακόμη χειρότερα, σε περίπτωση ηθελημένης διακοπής της τροφοδότησης μέρους του δικτύου για την εκτέλεση εργασιών συντήρησης και βλαβών, χωρίς την ύπαρξη διανεμημένης παραγωγής αρκούνταν ο συντηρητής να διακόψει τη σύνδεση με την κεντρική πύλη παροχής της ενέργειας αυτού. Με την διανεμημένη παραγωγή όμως, ακόμη και αν διακοπεί η τροφοδότηση από τον κεντρικό σταθμό, υπάρχουν εκατοντάδες άλλοι που παράγουν και είναι συνδεμένοι μεταξύ τους.

Ας χρησιμοποιήσουμε ένα παράδειγμα. Ένας μικρός οικισμός περιλαμβάνει πολλές οικίες που έχουν εγκατεστημένα στις στέγες τους φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία παρέχουν ισχύ στο δίκτυο. Για να γίνει συντήρηση του δικτύου απαιτείται η διακοπή τροφοδότησης του. Ακόμη όμως κι αν διακοπεί η κεντρική σύνδεση με το δίκτυο μεταφοράς μέσης τάσης, υπάρχει η περίπτωση η συνολικά παραγόμενη ισχύς από τα φωτοβολταϊκά να είναι ίση με την συνολικά καταναλισκόμενη στο δίκτυο του οικισμού, το οποίο με την αποσύνδεση από τον μετασχηματιστή μέσης τάσης είναι πλέον απομονωμένο. Αυτή η περίπτωση είναι κάτι παραπάνω από ανεπιθύμητη. Κατ' αρχάς για τον συντηρητή του δικτύου ο οποίος μπορεί να μην γνωρίζει ότι υπάρχει τάση στο δίκτυο. Επίσης αν δεν διακοπεί έγκαιρα η παροχή από τους αντιστροφείς, λόγω έλλειψης αδράνειας, μπορεί να συμβούν φαινόμενα διαταραχών της συχνότητας, της τάσης, με πιθανό αποτέλεσμα επιτάχυνση κινητήρων, καταστροφή ηλεκτρονικών συσκευών, ψυγείων και άλλων ευαίσθητων φορτίων.

Μέχρι τώρα η συνήθης πρακτική για τα συστήματα ελέγχου απομονωμένης λειτουργίας ήταν να μετράνε την τάση και στις τρεις φάσεις του δικτύου (όταν συμβεί κάποιο σφάλμα στο δίκτυο η τριφασική τάση αλλάζει).

Η κυματομορφή της τάσης όμως ενός μεγάλου ηλεκτρικού δικτύου κάθε άλλο παρά ιδανική είναι. Μια σειρά από παράγοντες επηρεάζουν συνεχώς την ποιότητά του. Συνήθη φαινόμενα σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο είναι η διαρκής κυμάτωση της τάσης, η συνεχής αυξομείωση της συχνότητας και κυρίως οι αιχμές και οι βυθίσεις που προκαλούνται από την ζεύξη - απόζευξη γεννητριών και κινητήρων ή άλλων φορτίων. Μέσα σ' αυτά περιλαμβάνεται και η υψηλή στάθμη αρμονικών που παρουσιάζεται όταν υπάρχουν πολλά ηλεκτρονικά ισχύος συνδεδεμένα.

Αφενός λοιπόν ένας αντιστροφέας πρέπει να είναι ανεκτικός στην παραπάνω ασταθή συμπεριφορά του ηλεκτρικού δικτύου, αφετέρου πρέπει να «καταλαβαίνει» γρήγορα πότε υπάρχει διακοπή στο δίκτυο, οπότε και να διακόψει τη λειτουργία του. Είναι μια περίπτωση που δύο αντιτιθέμενες απαιτήσεις πρέπει να καλυφθούν.

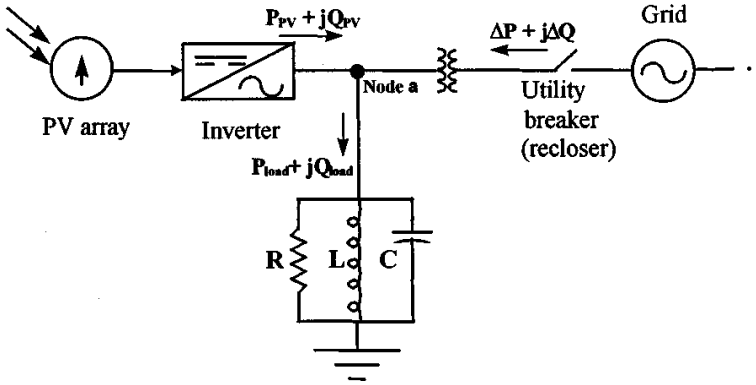
Αυστηρότερη ρύθμιση αυτών των ορίων, ελαχιστοποιεί τις πιθανότητες απομονωμένης λειτουργίας του αντιστροφέα, αλλά τον καθιστά παράλληλα περισσότερο ευαίσθητο στις διαταραχές του δικτύου χαμηλής τάσης.

Αντίθετα, χαλαρότερη ρύθμιση των παραπάνω ορίων, αυξάνει τις πιθανότητες απομονωμένης λειτουργίας, αλλά και καθιστά τον αντιστροφέα πιο ανεκτικό στις διαταραχές του δικτύου.

Μέχρι σήμερα διάφορες τεχνικές ελέγχου έχουν χρησιμοποιηθεί στους ηλεκτρονικούς αντιστροφείς ισχύος ώστε να εντοπίζουν την διακοπή της τάσεως του κεντρικού δικτύου και στη συνέχεια να διακόπτουν τη λειτουργία τους. Αυτές μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες.

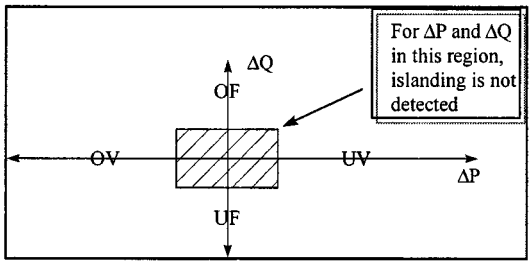
1) Τεχνικές παθητικής ανίχνευσης απομονωμένης λειτουργίας (passive methods)
2) Τεχνικές ενεργητικής ανίχνευσης απομονωμένης λειτουργίας (active methods)
3) Τεχνικές που υλοποιούνται από την πλευρά του κεντρικού δικτύου
4) Τεχνικές που βασίζονται στην επικοινωνία μεταξύ αντιστροφέα και δικτύου

Στο σχήμα φαίνεται μια τυπική διασύνδεση ενός αντιστροφέα φωτοβολταϊκών με ένα τυπικό φορτίο σύνθετης αντίστασης και διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο.



Εικόνα 2.28 **– Τυπική σύνδεση αντιστροφέα φωτοβολταϊκών στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το κοινό σημείο σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο και το τοπικό φορτίο ονομάζεται node a. Η ύπαρξη μετασχηματιστή δεν είναι απαραίτητη. Ο αντιστροφέας παρέχει ισχύ P_{PV} +jQ_{PV}, ενώ το τοπικό φορτίο στο μέρος όπου είναι εγκατεστημένος ο αντιστροφέας απορροφά φορτίο Pload+jQload. Έτσι η ροή ισχύος από και προς το δίκτυο είναι: ΔP=Pload-P_{PV}, και ΔQ=Qload-Q_{PV}. Συνήθως οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών παρέχουν μόνο ενεργό ισχύ, οπότε ΔQ=Qload**

Ως βασικό κριτήριο εξέτασης των αντιστροφέων ισχύος για την ικανότητα τους στην αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας χρησιμοποιείται η ζώνη μη-ανίχνευσης (None Detection Zone, NDZ). Η ζώνη αυτή ορίζεται ως η περιοχή μέσα στην οποία ο αντιστροφέας αποτυγχάνει να εντοπίσει την απομονωμένη λειτουργία. Οι άξονες της περιοχής καθορίζονται με βάση τις τιμές $\Delta P = P_{load} - P_{PV}$ και $\Delta Q = Q_{load} - Q_{PV}$ της ισχύος η οποία ρέει από το ηλεκτρικό δίκτυο προς το σημείο σύνδεσης αντιστροφέα – δικτύου (δηλαδή στο φορτίο). Για μικρές τιμές εγχεόμενης ισχύος, όπως φαίνεται από το διάγραμμα, ο αντιστροφέας αποτυγχάνει να εντοπίσει την διακοπή με το δίκτυο, εξακολουθώντας να τροφοδοτεί το φορτίο.



Εικόνα 2.29 – **Περιοχή στην οποία ο αντιστροφέας αποτυγχάνει να εντοπίσει την απομονωμένη λειτουργία (NDZ, none detection zone). Οριζόντιος άξονας: κατώτερο όριο επιτρεπτής τάσης, (αριστερά), ανώτερο όριο τάσης (δεξιά), κάθετος άξονας: κατώτερο όριο συχνότητας (κάτω), ανώτερο όριο συχνότητας (πάνω).**

Παθητικές μέθοδοι

2.3.6.1 Έλεγχος ορίων τάσης και συχνότητας (OVP/UVP, OFP/UFP)

Η πιο απλή μέθοδος για την αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας είναι η απλή προστασία υπότασης και υπέρτασης (UVP/OVP) καθώς και ο έλεγχος των ορίων της συχνότητας (UFP/OFP). Απλά κυκλώματα προστασίας δηλαδή που διακόπτουν τη σύνδεση της διανεμημένης γεννήτριας με το ηλεκτρικό δίκτυο, όταν διαπιστώσουν τάση ή συχνότητα έξω από τα όρια που έχουν καθοριστεί. Η ενεργός ισχύς στο φορτίο του ανωτέρω παραδείγματος θα είναι:

$$P_{load} = \frac{V_a^2}{R}$$ ενώ η άεργος ισχύς στο φορτίο θα δίνεται:

$$Q_{load} = V_a^2 \cdot \left\{ (\omega \cdot L)^{-1} - \omega \cdot C \right\}$$

Σε περίπτωση που ανοίξει ο διακόπτης με το υπόλοιπο δίκτυο, η τάση Va θα αυξηθεί ή θα μειωθεί μέχρι να εξισωθούν η ενεργός ισχύς του αντιστροφέα και του φορτίου, δηλαδή μέχρι $P_{load}=P_{PV}$

Ομοίως, εάν η άεργος ισχύς του φορτίου είναι διαφορετική από αυτή που παράγει ο αντιστροφέας η συχνότητα ω, θα αλλάξει ώστε να ικανοποιηθεί η εξίσωση:

$$Q_{load}=Q_{PV}$$

Ο μηχανισμός που λαμβάνει μέρος για αυτό το φαινόμενο εξηγείται καθώς το σύστημα του αντιστροφέα αναζητά μία συχνότητα στην οποία ο συντελεστής ισχύος τάσης – ρεύματος cosφ του φορτίου θα εξισωθεί με αυτόν του αντιστροφέα.

Δεδομένου ότι κατά βάση οι αντιστροφείς ισχύος των φωτοβολταϊκών είναι ρυθμισμένοι ώστε να λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος (cosφ=1), η συνθήκη αυτή καθίσταται:

$$Q_{PV} = Q_{load} = 0 \Rightarrow$$
$$\arg\left\{ R^{-1} + (j\omega L)^{-1} + (j\omega L) \right\}^{-1} = 0 \Rightarrow$$
$$\omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

, δηλαδή η συχνότητα συντονισμού του φορτίου.

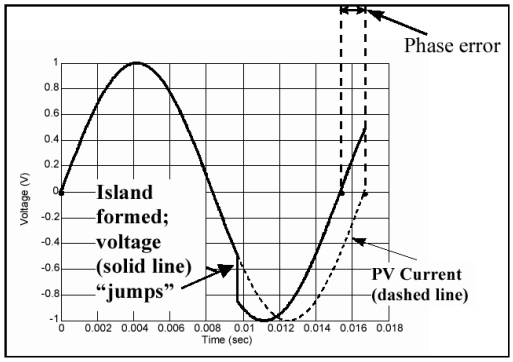
Αυτή η μέθοδος ελέγχου αν και είναι αναγκαία για κάθε αντιστροφέα που συνδέεται με το κεντρικό δίκτυο, θεωρείται αρκετά απλοϊκή γιατί δεν μπορεί να παρακολουθήσει τα δυναμικά φαινόμενα που συμβαίνουν συχνά σ' αυτό, καθώς και την παρουσία αρμονικών, αποτυγχάνοντας έτσι πολλές φορές να εντοπίσει την απομονωμένη λειτουργία.

2.3.6.2 Έλεγχος ολίσθησης φάσης (Phase Jump Detection, PJD)

Κατά την τεχνική αυτή, το προς έλεγχο μέγεθος είναι η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης εξόδου του αντιστροφέα και του ρεύματος. Εάν ανιχνευθεί ένα απότομο άλμα σε αυτή τη διαφορά φάσης, ο αντιστροφέας αποσυνδέεται, εντοπίζοντας διακοπή του κεντρικού δικτύου.

Κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η κυματομορφή του ρεύματος ενός αντιστροφέα πηγής ρεύματος, συγχρονίζεται με την τάση του δικτύου ανιχνεύοντας τα περάσματα από τους μηδενισμούς της τάσης Va. Ο συγχρονισμός αυτός γίνεται χρησιμοποιώντας ένα αναλογικό ή ψηφιακό βρόγχο κλειδώματος φάσης (PLL).

Εάν λοιπόν η σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο διακοπεί, η τάση Va στο σημείο της σύνδεσης δεν ελέγχεται πλέον από την τάση του δικτύου. Ωστόσο το ρεύμα του αντιστροφέα παραμένει αμετάβλητο, καθώς ακολουθεί την κυματομορφή αναφοράς που παράγεται από το PLL. Τη στιγμή της αποσύνδεσης απ' το δίκτυο και μεταξύ των μηδενισμών, είναι το ρεύμα του αντιστροφέα που γίνεται η κυματομορφή αναφοράς της φάσης. Δεδομένου ότι η συχνότητα δεν έχει ακόμη αλλάξει, η τάση Va πρέπει να μεταβεί σε μια νέα τιμή, καθώς η φασική γωνία του φορτίου δεν αλλάζει. Στον επόμενο μηδενισμό της Va, η προκαλούμενη διαφορά φάσης μεταξύ της νέας τάσης Va και του ρεύματος του αντιστροφέα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να εντοπιστεί η απομονωμένη λειτουργία, για κάποια καθορισμένη τιμή αυτής και πάνω.



Εικόνα 2.30 **– Μέθοδος ολίσθησης φάσης (PJD). Ρυθμίζοντας ένα κατώφλι του άλματος μεταξύ τάσης και έντασης που προκαλείται στους αντιστροφείς πηγής έντασης, όταν χάνουν την κυματομορφή αναφοράς του δικτύου, εντοπίζεται η απομονωμένη λειτουργία.**

Αν και η υλοποίηση ενός τέτοιου ελέγχου είναι εύκολη, δεδομένου ότι ένα κύκλωμα κλειδώματος φάσης υπάρχει σε κάθε grid-tie αντιστροφέα, αυτός μπορεί να αποτυγχάνει σε πολλές περιπτώσεις φορτίων (π.χ. εκκίνηση κινητήρων) οι οποίες προκαλούν απότομα πηδήματα στη φάση.

2.3.6.3 Έλεγχος αρμονικών τάσης

Κατά τη μέθοδο αυτή, ο αντιστροφέας μετράει την συνολική αρμονική παραμόρφωση της τάσης THD στο κοινό σημείο σύνδεσης με το δίκτυο (node a). Διακόπτει τη λειτουργία του αντιστροφέα, υποθέτοντας islanding, εάν η παραμόρφωση υπερβεί ένα προκαθορισμένο όριο.

Η λειτουργία αυτού του ελέγχου προϋποθέτει ένα στιβαρό και άπειρο ηλεκτρικό δίκτυο για τη διασύνδεση του αντιστροφέα. Ένα τέτοιο δίκτυο, δεδομένης της πολύ χαμηλής σύνθετής του αντίστασης, μπορεί και «απορροφά» το μικρό ποσοστό αρμονικών που παράγει ο αντιστροφέας σε κανονική λειτουργία (συνήθως κάτω από 5%), έχοντας σαν αποτέλεσμα μια τάση στο σημείο α, Va, ελάχιστα παραμορφωμένη.

Αντίθετα, όταν διακοπεί η σύνδεση με το δίκτυο, δύο φαινόμενα συμβάλλουν στην εμφάνιση μεγάλων αρμονικών στην τάση Va. Το πρώτο είναι η λειτουργία του ίδιου του αντιστροφέα, ο οποίος βασίζει τη λειτουργία του σε ημιαγώγιμα στοιχεία υψηλής διακοπτικής συχνότητας, οπότε παράγει έτσι κι αλλιώς ένα μικρό ποσοστό αρμονικών. Υπό κανονικές συνθήκες αυτό παραμένει μικρό, κάτω από 5%. Κατά την αποσύνδεση όμως από το δίκτυο, το υπόλοιπο μέρος που συνδέεται με τον αντιστροφέα, το φορτίο δηλαδή, παρουσιάζει μια σύνθετη αντίσταση πολύ μεγαλύτερη από αυτή του δικτύου, επιδρώντας έτσι στην αύξηση των ήδη παραγόμενων αρμονικών τάσης. Για τον έλεγχο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία ανώτερη τιμή για την THD της Va, είτε η μεταβολή του μεγέθους των αρμονικών ΔTHD.

Εάν επιπλέον ο αντιστροφέας συνδέεται με το κεντρικό δίκτυο στο σημείο α, μέσω ενός μετασχηματιστή απομόνωσης ή ΧΤ/ΜΤ, η μεταβολή στις αρμονικές μπορεί να είναι ακόμη εντονότερη. Μια τέτοια επίδραση μπορεί να υπάρξει αν ο αυτόματος διακόπτης σύνδεσης βρίσκεται από την πλευρά του κεντρικού δικτύου και ο αντιστροφέας είναι τύπου πηγής έντασης. Άνοιγμα του διακόπτη με το δίκτυο αφήνει το δευτερεύον του μετασχηματιστή συνδεδεμένο με τον αντιστροφέα. Η μαγνητική υστέρηση και άλλα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του πυρήνα του μετασχηματιστή, μπορούν να συντελέσουν στην αύξηση των αρμονικών στην τάση Va. Παρόμοιες πηγές αρμονικής παραμόρφωσης μπορεί να υπάρχουν και στο τοπικό φορτίο, όπως δίοδοι ισχύος, διακοπτικά τροφοδοτικά, κ.α. Η επίδραση ιδιαίτερα της τρίτης αρμονικής στην τάση του αντιστροφέα μπορεί να είναι σημαντική, εν συγκρίσει με την επίδραση που θα υπήρχε στην τάση του άπειρου δικτύου.

Αδύνατο σημείο της ανωτέρω μεθόδου είναι η δυσκολία καθορισμού των ορίων της συνολικής παραμόρφωσης, εξαιτίας των διαφορετικών χαρακτηριστικών που υπάρχουν σε κάθε ηλεκτρικό δίκτυο. Φαινόμενα όπως η ζεύξη – απόζευξη πυκνωτών αντιστάθμισης ή παρουσία έντονων επαγωγικών ή χωρητικών φορτίων μπορεί να ερμηνευθούν από τον αντιστροφέα ως islanding, προκαλώντας συνεχείς αποσυνδέσεις αυτού.

Ενεργητικές μέθοδοι στην πλευρά του αντιστροφέα

2.3.6.4 Μέτρηση της σύνθετης αντίστασης

Όταν ο αντιστροφέας εμφανίζεται στο δίκτυο σαν μια πηγή έντασης, όπου:

$$I_{PV} = I_{PV} \cdot \sin(\omega_{PV} \cdot t + \phi_{PV})$$

Στη σχέση αυτή μπορούν να μεταβάλλονται το πλάτος, η συχνότητα ή η φάση.

Στη μέθοδο μεταβολής της εξόδου, σε ένα από αυτά τα μεγέθη προκαλείται μια συνεχής διαταραχή, συνήθως στο πλάτος. Όταν ο αντιστροφέας συνδέεται με το δίκτυο, η τιμή της διαταραχής που προκαλείται στην τάση από την διαταραχή στο πλάτος του ρεύματος (που είναι και διαταραχή στην ισχύ), είναι συνάρτηση των χαρακτηριστικών τιμών της αντίστασης του δικτύου και της ισχύος. Η σχέση αυτή είναι:

$$\Delta V = \frac{\Delta P}{2} \cdot \sqrt{\frac{R}{P}}$$

Όταν το δίκτυο αποσυνδεθεί από τον αντιστροφέα, η διαταραχή αυτή στο πλάτος του ρεύματος θα προκαλέσει αξιοσημείωτη μεταβολή στην τάση Va, η οποία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποτροπή της απομονωμένης λειτουργίας. Ουσιαστικά το μετρού-

μενο μέγεθος από τον αντιστροφέα είναι ο ρυθμός μεταβολής $\frac{dV_a}{dI_{PV}}$, γι' αυτό και η μέθοδος αποκαλείται μέθοδος μέτρησης της σύνθετης αντίστασης. Εφ' όσον ο αντιστροφέας μπορεί να τροφοδοτήσει φορτίο μέχρι η απομονωμένη τάση να φτάσει στο όριο του παραθύρου υπο/υπέρτασης, η ελάχιστη μεταβολή στο ρεύμα που απαιτείται για να ανιχνευθεί η απομονωμένη λειτουργία είναι ανάλογη ολόκληρου του παραθύρου. Αν για παράδειγμα υπάρχει ένα παράθυρο τάσης +-10% της κανονικής τιμής, μια μεταβολή 20% στο ρεύμα απαιτείται για την ανίχνευση.

2.3.6.5 Μέτρηση της αντίστασης σε συγκεκριμένη συχνότητα

Η μέθοδος αυτή είναι ειδική περίπτωση της παθητικής μεθόδου της μέτρησης της αρμονικής παραμόρφωσης. Θεωρείται όμως ενεργητική μέθοδος καθότι, κατ' αυτήν, εισάγεται σκόπιμα μια αρμονική ρεύματος συγκεκριμένης συχνότητας στο σημείο σύνδεσης του αντιστροφέα με το δίκτυο (έξοδος του αντιστροφέα). Όταν το δίκτυο είναι διασυνδεδεμένο, αν η σύνθετη αντίσταση αυτού είναι πολύ μικρότερη από αυτή του τοπικού φορτίου στη συχνότητα της εισαγόμενης αρμονικής, τότε το αρμονικό ρεύμα αυτό ρέει προς το δίκτυο και δεν παρατηρείται μεταβολή στην τάση.

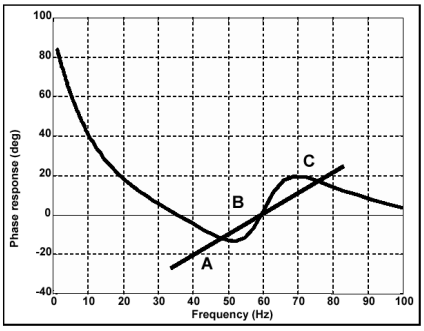
Όταν όμως το δίκτυο αποσυνδεθεί, το αρμονικό αυτό ρεύμα ρέει στο τοπικό φορτίο. Υποθέτοντας ότι το τοπικό φορτίο είναι γραμμικό, αυτό θα παράγει εξαιτίας της εισαγόμενης αρμονικής μια αρμονικά παραμορφωμένη τάση, η οποία και μπορεί να ανιχνευθεί. Το πλάτος της αρμονικής τάσης που παράγεται είναι ανάλογο της σύνθετης αντίστασης του φορτίου στην συγκεκριμένη συχνότητα του αρμονικού ρεύματος.

Η μέθοδος αυτή έχει τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα με αυτήν της μέτρησης της αρμονικής παραμόρφωσης, επιπρόσθετα δε μπορεί να είναι πολύ αναξιόπιστη όταν υπάρχουν πολλοί αντιστροφείς διασυνδεδεμένοι στο δίκτυο και εισάγουν αρμονικό ρεύμα ελέγχου, δεδομένου ότι η άθροιση αυτών θα έδινε αρκετά σημαντικές τιμές.

2.3.6.6 Slip mode frequency drift (SMS)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μια μέθοδο θετικής ανάδρασης για να αποσταθεροποιήσει τον αντιστροφέα όταν το δίκτυο αποσυνδεθεί, αποτρέποντάς τον έτσι να φτάσει σε ένα σημείο ισορροπίας και να λειτουργήσει απομονωμένα σ' αυτό. Η θετική ανάδραση σε ένα αντιστροφέα πηγής ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε στο πλάτος, είτε στη συχνότητα, είτε στη φάση του ρεύματος.

Καθώς οι περισσότεροι αντιστροφείς για φωτοβολταϊκά λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, η διαφορά φάσης μεταξύ του ρεύματος αυτών και της τάσης του δικτύου ελέγχεται να είναι όσο πιο κοντά στο μηδέν. Κατά τη μέθοδο αυτή, η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης – έντασης του αντιστροφέα, αντί να ρυθμίζεται στο μηδέν, προκύπτει ως συνάρτηση της συχνότητας του δικτύου Va.



Εικόνα 2.31 **– Γράφημα της διαφοράς φάσης τάσης – έντασης συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας ενός αντιστροφέα που χρησιμοποιεί την μέθοδο SMS για την αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας. Η ονομαστική συχνότητα λειτουργίας στο γράφημα είναι τα 60Hz.**

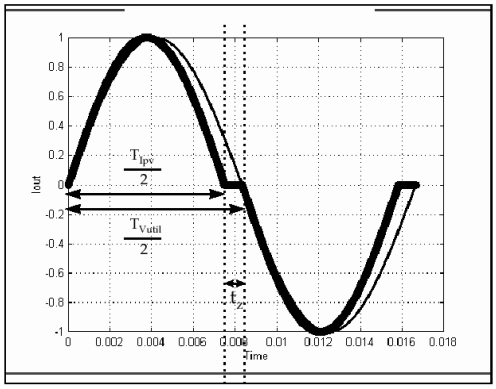
Όταν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο, επιβάλλει στον αντιστροφέα μια σταθερή τάση και συχνότητα για την έξοδό του. Η συνάρτηση της φάσης του αντιστροφέα στο σημείο που τέμνει την ευθεία του φορτίου (υποθέτοντας γραμμικό φορτίο), καθορίζει τη συχνότητα λειτουργίας.

Αν το δίκτυο αποσυνδεθεί, όπως φαίνεται από την καμπύλη απόκρισης της φάσης, μικρή απομάκρυνση από τη συχνότητα αναφοράς του σημείου Β, θα αυξήσει το σφάλμα στη φάση, δεδομένου ότι το Β είναι ένα ασταθές σημείο λειτουργίας. Η αστάθεια αυτή θα προσπαθήσει να φέρει το σύστημα αντιστροφέας – φορτίο σε νέο σημείο ισορροπίας (σημείο Α ή C). Σχεδιαζόμενα τα σημεία Α και C έξω από το παράθυρο των επιτρεπτών συχνοτήτων θα προκαλέσουν αποσύνδεση του αντιστροφέα.

Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά αξιόπιστη, ακόμη και στην περίπτωση πολλών αντιστροφέων διασυνδεδεμένων πολύ κοντά στο δίκτυο. Μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα, καθώς αποτελεί τροποποίηση του βρόγχου κλειδώματος φάσης, απαραίτητου στοιχείου σε κάθε αντιστροφέα grid-tie. Ωστόσο, μπορεί να αποτύχει να εντοπίσει την απομονωμένη λειτουργία, αν η χαρακτηριστική απόκρισης φάσης – συχνότητας του τοπικού φορτίου, αυξάνεται πιο γρήγορα απ' ότι αυτή του αντιστροφέα. Για αυτά τα φορτία, η λειτουργία σε συχνότητες κοντά στην ονομαστική του δικτύου, είναι ένα σταθερό σημείο ισορροπίας και καθιστούν τον έλεγχο ανενεργό. Πρακτικά, τέτοια είναι τα μεγάλα χωρητικά φορτία με ιδιοσυχνότητες πολύ κοντά σε αυτές του δικτύου.

2.3.6.7 Frequency bias (Active Frequency Drift)

Η μέθοδος της ενεργού ολίσθησης της συχνότητας (AFD), είναι μια μέθοδος που υλοποιείται στον αντιστροφέα με ένα ελεγκτή - μικροεπεξεργαστή. Κατ' αυτήν, το ρεύμα που παράγεται από τον αντιστροφέα παραμορφώνεται ελάχιστα έτσι ώστε να υπάρχει μια συνεχής τάση για να μεταβληθεί η συχνότητα. Ωστόσο, όταν ο αντιστροφέας είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο, είναι αδύνατον να αλλάξει την συχνότητα.



Εικόνα 2.32 **– Κυματομορφή που χρησιμοποιεί η μέθοδος ενεργού ολίσθησης συχνότητας για τον εντοπισμό απομονωμένης λειτουργίας.**

Όταν υπάρξει αποσύνδεση με το δίκτυο, η συχνότητα της τάσης Va αναγκάζεται να αυξηθεί ή να μειωθεί, αποκρινόμενη στη φυσική κλίση της συχνότητας του συστήματος αντιστροφέας – φορτίο (σχέση $Q_{load} = V_a^{\,2} \cdot \left\{(\omega L)^{-1} - \omega C\right\}$) και ψάχνοντας την ιδιοσυχνότητα του φορτίου ω_0. Στο σχήμα φαίνεται η παραμορφωμένη κυματομορφή του ρεύματος του αντιστροφέα, με περίοδο Tipv, ενώ Tvutil είναι η περίοδος της τάσης του δικτύου (καθαρά ημιτονική μορφή). Υπάρχει ένας νεκρός χρόνος tz, ο οποίος χρησιμοποιείται για να οριστεί το κλάσμα αποκοπής:

$$cf = \frac{2 \cdot t_z}{T_{Vutil}}$$

Κατά το πρώτο τμήμα της περιόδου, το ρεύμα του αντιστροφέα έχει συχνότητα λίγο μεγαλύτερη από αυτή της τάσης του δικτύου. όταν το ρεύμα του αντιστροφέα φθάσει στο μηδέν, παραμένει μηδέν για ένα χρόνο tz πριν διαγράφει τη δεύτερη ημιπερίοδο. Για το πρώτο τμήμα της δεύτερης ημιπεριόδου, το ρεύμα του αντιστροφέα είναι το μισό αρνητικό του ημιτόνου της πρώτης ημιπεριόδου. Αφού το ρεύμα μηδενιστεί ξανά, παραμένει στο μηδέν, μέχρι να εντοπιστεί μηδενισμός της τάσης του δικτύου. Τονίζεται ότι ο νεκρός χρόνος στην δεύτερη ημιπερίοδο δεν είναι σταθερός ούτε ίσος με tz.

Όταν αυτή η κυματομορφή ρεύματος εφαρμοσθεί σε ένα ωμικό φορτίο σε απομονωμένη λειτουργία, η απόκριση της τάσης θα ακολουθήσει το παραμορφωμένο ρεύμα και θα μηδενιστεί σε χρόνο Tvutil-tz, μικρότερο από αυτόν μιας καθαρά ημιτονοειδούς διέγερσης. Αυτό προκαλεί το πέρασμα από τους μηδενισμούς της τάσης να συμβαίνει γρηγορότερα από ότι αναμένεται, προκαλώντας έτσι αύξηση στο σφάλμα της φάσης μεταξύ Va και Ipv. Τότε ο αντιστροφέας αυξάνει τη συχνότητα του ρεύματος Ipv προσπαθώντας να αντισταθμίσει το σφάλμα στη φάση. Επειδή η απόκριση τάσης του ωμικού φορτίου βρίσκει ξανά τους μηδενισμούς της τάσης πιο μπροστά από ότι αναμένεται, ο αντιστροφέας εξακολουθεί να ανιχνεύει σφάλμα στη φάση τάση – έντασης όποτε συνεχίζει να αυξάνει τη συχνότητα. Η δυναμική αυτή διαδικασία συνεχίζεται απομακρύνοντας τη συχνότητα από την ονομαστική, με αποτέλεσμα να φτάσει στα όρια OFP/UFP, οπότε και θα διακοπεί η λειτουργία του αντιστροφέα.

Η μέθοδος αυτή προκαλεί μικρή μείωση στην ισχύ εξόδου του αντιστροφέα, ενώ επιπρόσθετα θα μπορούσε να καταστεί ανενεργή αν πολλοί αντιστροφείς είναι διασυνδεδεμένοι σε ένα απομονωμένο δίκτυο. Αυτό γιατί η απόκλιση που εισάγεται στην συχνότητα είναι δυνατόν να αλληλοαναιρεθεί αν κάποιοι αντιστροφείς εισάγουν άλματα ενώ άλλοι βυθίσματα.

2.3.6.8 Sandia Frequency Drift

Η μέθοδος αυτή είναι παραλλαγή της AFD, και χρησιμοποιεί ομοίως θετική ανάδραση για την αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας. Σ' αυτήν, η θετική ανάδραση εφαρμόζεται στη συχνότητα της τάσης Va. Το κλάσμα αποκοπής διαμορφώνεται σ' αυτή την περίπτωση ως εξής:

$$cf = c_{f0} + K\left(f_a - f_{line}\right), \text{ όπου:}$$

c_{f0}, το κλάσμα αποκοπής όταν δεν υπάρχει σφάλμα συχνότητας,
K, το πολλαπλασιαστικό κέρδος,
f_a, η μετρούμενη συχνότητα της τάσης Va,
f_{line}, η συχνότητα του δικτύου

Όταν ο αντιστροφέας είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο, η μέθοδος αυτή, ανιχνεύοντας επουσιώδεις αλλαγές στη συχνότητα προσπαθεί να τις επιταχύνει αλλά η στιβαρότητα του δικτύου αποτρέπει κάτι τέτοιο.

Όταν το δίκτυο αποσυνδεθεί αύξηση της συχνότητας fa θα προκαλέσει αύξηση στο σφάλμα της συχνότητας, άρα και του κλάσματος αποκοπής. Έτσι και ο αντιστροφέας αυξάνει τη συχνότητά του. Ο αντιστροφέας δρα στη συνέχεια έτσι ώστε να ενισχύσει την απόκλιση στη συχνότητα και η διαδικασία ανακυκλώνεται μέχρι να φτάσει στο ανώτατο επιτρεπόμενο όριο OFP, οπότε και διακόπτεται η λειτουργία του αντιστροφέα.

Η ρύθμιση της ζώνης NDZ μπορεί να γίνει με την κατάλληλη ρύθμιση του κέρδους K, ώστε σε αδύναμα και ασταθή δίκτυα να μην προκαλείται συνεχής διακοπή του αντιστροφέα. Αντίθετα σε στιβαρά δίκτυα το παράθυρο της ζώνης μη ανίχνευσης μπορεί να ρυθμιστεί μικρό έτσι ώστε να ανιχνεύεται αμέσως η απομονωμένη λειτουργία.

2.3.6.9 Sandia Voltage Shift (SVS)

Κατ' αυτήν την μέθοδο η θετική ανάδραση εφαρμόζεται στο πλάτος της τάσης Va. Όταν υπάρξει μείωση στο πλάτος της τάσης Va , ο αντιστροφέας μειώνει το ρεύμα εξόδου του, άρα και την ισχύ εξόδου του. Αν το δίκτυο είναι παρόν, δεν προκαλείται καμία μεταβολή από την μείωση της ισχύος.

Όταν όμως το δίκτυο αποσυνδεθεί, μείωση στο πλάτος της τάσης Va, θα προκαλέσει περαιτέρω μείωση στην τάση Va, όπως προκύπτει από το νόμο του Ohm παρόντος του τοπικού φορτίου. Η μείωση αυτή στην τάση προκαλεί στη συνέχεια μείωση στο ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα, σχηματίζοντας ένα βρόγχο που μειώνει συνεχώς την τάση, μέχρι να ανιχνευθεί από το παράθυρο της υπότασης UVP.

Το σκεπτικό σ' αυτή τη διαδικασία ελέγχου είναι να υπάρχει μια επιταχυντική διαδικασία που να προκαλεί αλλαγές στην ενεργό ή άεργο ισχύ όταν υπάρχει αλλαγή στην συχνότητα ή στην τάση. Εάν η απόκριση της ισχύος είναι εκθετική, τότε διαταραχή στην συχνότητα ή τάση, θα προκαλέσει αυτή την επιτάχυνση και γρήγορα θα φτάσει σε σημείο OVP/UVP ώστε να διακοπεί η λειτουργία του. Η επιταχυντική αυτή διαδικασία δεν είναι αισθητή όταν είναι παρόν το δίκτυο, ενώ όταν αποσυνδέεται κρατά το χρόνο απόκρισης πολύ μικρό.

Όπως και οι άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούν θετική ανάδραση, η μέθοδος επιδρά σε μία μικρή μείωση της ισχύος εξόδου του αντιστροφέα. Η μέθοδος αυτή σε συνεργασία με την προηγούμενη (SFS), έχουν ως αποτέλεσμα πολύ μικρή ζώνη μη-εντοπισμού NDZ, εντοπίζοντας αμέσως την απομονωμένη λειτουργία.

Ωστόσο, σε πολύ αδύναμα δίκτυα και παρουσία πολλών αντιστροφέων που χρησιμοποιούν την ίδια τεχνική, μπορεί να είναι ιδιαίτερα δυσμενής για την συνολική σταθερότητα του δικτύου, καθώς διαταραχές στην τάση και τη συχνότητα προκαλούμενες από τα φορτία,

είναι δυνατόν να προκαλούν αποσύνδεση των αντιστροφέων εντείνοντας την αστάθεια του συνολικού δικτύου.

2.3.6.10 Frequency Jump

Η μέθοδος αυτή αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου frequency bias και μοιάζει με την μέτρηση της αντίστασης του δικτύου. Το σκεπτικό είναι ως εξής: περιοχές νεκρού χρόνου εισάγονται στην κυματομορφή εξόδου του ρεύματος, αλλά όχι σε κάθε κύκλο (π.χ. κάθε τρίτο κύκλο). Η συχνότητα διαταράσσεται με συγκεκριμένο τρόπο.

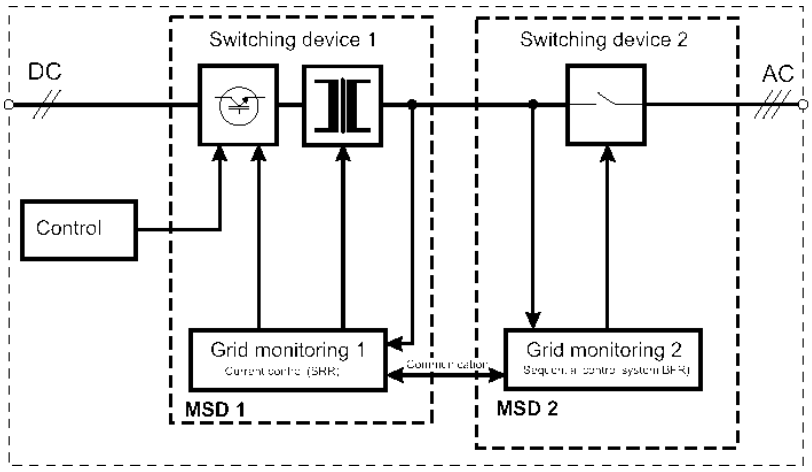
Παρόντος του δικτύου, αυτό είναι που επιβάλλει την ημιτονοειδή κυματομορφή Va, παρόλη την παραμορφωμένη κυματομορφή εξόδου του αντιστροφέα. Αντίθετα όταν το δίκτυο αποσυνδεθεί, η μέθοδος αυτή είτε προκαλεί απόκλιση στην συχνότητα ή μπορεί να ανιχνεύσει την μεταβολή στη συχνότητα της απομονωμένης τάσης που ταιριάζει με την καθορισμένη διαταραχή που εισάγεται.

Η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική αν όλοι οι αντιστροφείς ακολουθούν την ίδια τεχνική για την απόκλιση της συχνότητας. Αν η απόκλιση γίνεται σε άλλους προς τα πάνω ή σε άλλους προς τα κάτω, τότε η μεταβολή μπορεί να αλληλοαναιρεθεί ακυρώνοντάς την ανίχνευση.

2.3.6.11 Mains Monitoring With Allocated All-Pole Switching Devices Connected in Series. (MSD) ή (ENS)

Η μέθοδος αυτή έχει γίνει προδιαγραφή για τους αντιστροφείς που συνδέονται στα ηλεκτρικά δίκτυα της Γερμανίας και της Αυστρίας και ουσιαστικά αποτελεί ένα συνδυασμό δύο ξεχωριστών μεθόδων ανίχνευσης και αποσύνδεσης. Οι δύο διατάξεις είναι συνδεδεμένες σε σειρά στα καλώδια εξόδου του αντιστροφέα και στον ουδέτερο, αλλά παρ' ότι είναι συνδεμένες εν σειρά ελέγχονται ανεξάρτητα. Οι δύο διατάξεις μετράνε την τάση, την αντίσταση και την συχνότητα του δικτύου. Ανάλογα με τις τιμές των παραθύρων που καθορίζονται για το κάθε μέγεθος μπορούν να διακόπτουν την λειτουργία ανιχνεύοντας απομονωμένη λειτουργία, με τη βοήθεια ηλεκτρονόμων ή αυτόματων διακοπτών.

Η μέτρηση της σύνθετης αντίστασης του δικτύου γίνεται συνήθως με τη βοήθεια ενός μικρού παλμού ρεύματος που εισάγεται σε αυτό. Η διάταξη ανιχνεύει την μεταβολή στην αντίσταση αυτή για κάποιο καθορισμένο χρονικό διάστημα. Για αντιστροφείς σε οικιακές εφαρμογές, τυπικό κριτήριο απομονωμένης λειτουργίας έχει οριστεί το $\Delta z>0,5$ Ohm (δίκτυα ΗΠΑ). Η τιμή αυτή εξαρτάται πάντα από τα χαρακτηριστικά του κεντρικού δικτύου και διαφέρει στους κανονισμούς από χώρα σε χώρα (για τα δίκτυα της Ευρώπης συνήθως $\Delta z>1,2$Ohm). Σε κάθε περίπτωση η μέθοδος αυτή μπορεί να υλοποιηθεί σε στιβαρά δίκτυα, διαφορετικά μικρές τιμές των παραθύρων Δz είναι δυνατόν να προκαλούν αναίτιες και συχνές αποσυνδέσεις του αντιστροφέα.



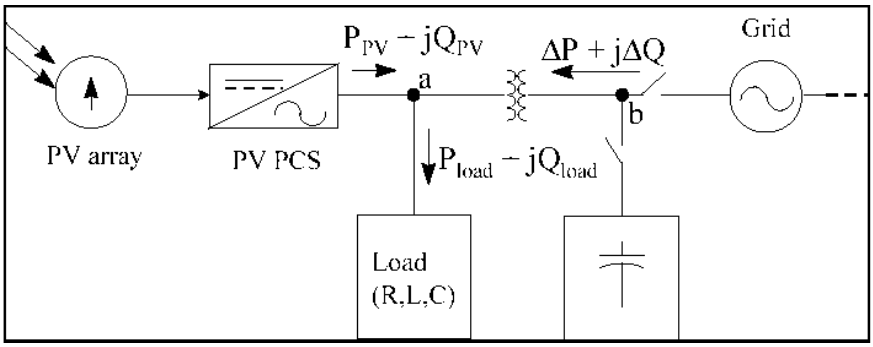
Εικόνα 2.33 **- Γερμανικό στάνταρντ DIN VDE 0126 για την προστασία ENS αποφυγής απομονωμένης λειτουργίας**

Η μέθοδος αυτή, λόγω των πολλαπλών ελέγχων προσφέρει μεγάλη αξιοπιστία στον έλεγχο για απομονωμένη λειτουργία. Λόγω του μικρού παλμού ρεύματος που εξάγεται για την μέτρηση της σύνθετης αντίστασης του δικτύου, υπάρχει θεωρητικά η πιθανότητα αλληλεπίδρασης αυτού με άλλους αντιστροφείς που χρησιμοποιούν την ίδια τεχνική και είναι συνδεδεμένοι σε κοντινά σημεία στο δίκτυο.

Μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην πλευρά του δικτύου

2.3.6.12 Εισαγωγή σύνθετης αντίστασης

Κατά τη μέθοδο αυτή, μία σύνθετη αντίσταση, συνήθως ένας πυκνωτής εισάγεται στην πλευρά του δικτύου μετά τον μετασχηματιστή που συνδέει τον αντιστροφέα και τα τοπικά φορτία με το δίκτυο (σημείο b).



Εικόνα 2.34 **– Τοπολογία αντιστροφέα φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιεί σύνθετη αντίσταση για τον εντοπισμό της απομονωμένης λειτουργίας**

Ο διακόπτης του πυκνωτή είναι υπό κανονικές συνθήκες ανοιχτός. Άνοιγμα όμως του διακόπτη που συνδέει το δίκτυο με τον αντιστροφέα είναι καθορισμένο να προκαλεί με μια χρονική υστέρηση κλείσιμο του διακόπτη του πυκνωτή, συνδέοντας τον με το απομονωμένο δίκτυο του αντιστροφέα. Η ένταξη αυτού του πυκνωτή, ακόμη κι αν το τοπικό φορτίο που εξυπηρετείται εκείνη τη στιγμή είναι τέτοιο ώστε να δυσκολεύει τον αντιστροφέα στην ανίχνευση της απομονωμένης λειτουργίας, θα προκαλέσει ανισορροπία στο ισοζύγιο ισχύος

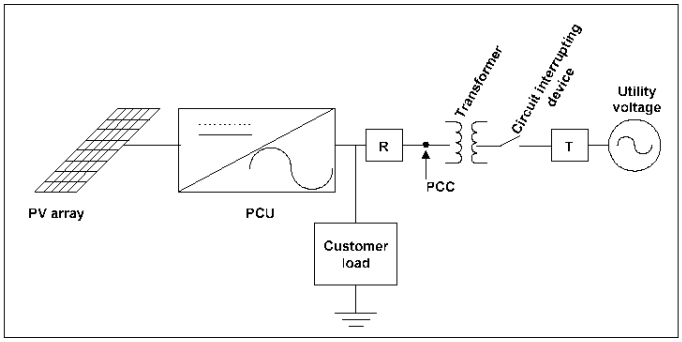
αντιστροφέα – συνολικού φορτίου προκαλώντας άλμα στη συχνότητα ή ξαφνική ολίσθηση αυτής, οπότε και θα ανιχνευθεί από το κύκλωμα ελέγχου της τάσης (OFP/UFP).

Η μέθοδος αυτή προσφέρει το πλεονέκτημα ότι το φορτίο που απαιτείται είναι οι κοινοί πυκνωτές αντιστάθμισης της τάσης που χρησιμοποιούνται ευρέως στα ηλεκτρικά δίκτυα, με την ανάλογη μεγάλη πείρα που υπάρχει στη χρήση τους. Ωστόσο το κόστος που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός τέτοιου κυκλώματος είναι αρκετά υψηλό, κάτι ιδιαίτερα αρνητικό για τις έτσι κι αλλιώς ακριβές εγκαταστάσεις των ανανεώσιμων πηγών. Επίσης ο χρόνος απόκρισης αυτού του κυκλώματος ελέγχου είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν που υλοποιείται με τους μικροεπεξεργαστές πάνω στον αντιστροφέα, καθώς εξαρτάται άμεσα από το χρόνο απόκρισης των αυτόματων διακοπών του δικτύου και του πυκνωτή.

2.3.6.13 Χρήση επικοινωνιών ελέγχου μέσα από τις γραμμές του δικτύου

Η μέθοδος αυτή έχει προταθεί ως λύση για την εξάλειψη πολλών από τα προβλήματα που δημιουργούν τα κυκλώματα ελέγχου στον ίδιο τον αντιστροφέα. Η λογική είναι η εξής:

Στην πλευρά του δικτύου, μια κατάλληλη διάταξη εισάγει στις γραμμές χαμηλής τάσης ένα σήμα ελέγχου χαμηλής ενέργειας το οποίο μεταφέρεται μέχρι τον αντιστροφέα. Το σήμα αυτό ανιχνεύεται από άλλη διάταξη από την πλευρά του αντιστροφέα, διαπιστώνοντας έτσι την ύπαρξη του δικτύου. Αν το σήμα διακοπεί, είναι ένδειξη ότι διακόπηκε και η σύνδεση με το δίκτυο. Ο δέκτης του σήματος μπορεί να είναι ενσωματωμένος στον αντιστροφέα ή να υφίσταται ως ξεχωριστή συσκευή.



Εικόνα 2.35 **– Χρήση συστημάτων επικοινωνίας μεταξύ αντιστροφέα και δικτύου για τον εντοπισμό απομονωμένης λειτουργίας. Θεωρητικά η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χειρισμό του αντιστροφέα από τον διαχειριστή του δικτύου, όπως με μια σύγχρονη γεννήτρια.**

Η δυνατότητα της διάταξης που υπάρχει στην πλευρά του δικτύου να στέλνει σήμα ελέγχου μέσω των γραμμών του ρεύματος, προσφέρει το πλεονέκτημα μιας ευέλικτης συνεργασίας μεταξύ δικτύου – αντιστροφέων.

Μπορεί να χρησιμεύσει είτε ως στοιχείο ελέγχου της συχνότητας και της τάσης του δικτύου, π.χ. στέλνοντας σήμα για αποσύνδεση των αντιστροφέων σε περίπτωση χαμηλής κατανάλωσης (αν παρατηρείται αύξηση της τάσης δηλαδή).

Απ' την άλλη αν ο αντιστροφέας έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί αυτόνομα σαν γεννήτρια ενός μικροδικτύου, ρυθμίζοντας ο ίδιος την τάση και συχνότητα, ο δέκτης του σήματος είναι δυνατόν να διακόψει τη σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο, αλλάζοντας τη λειτουργία του αντιστροφέα από διασυνδεδεμένη σε αυτόνομη.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα από τις ηλεκτρικές εταιρίες για τον έλεγχο τεχνικών φορτίων αντιστάθμισης της τάσης (ζεύξη – απόζευξη πυκνωτών), όπως και για τον έλεγχο μετρητών ενέργειας. Είναι δυνατόν λοιπόν να χρησιμοποιηθεί ένα ήδη υπάρχον κέντρο εκπομπής σήματος για τον έλεγχο αντιστροφέων. Το σήμα βέβαια πρέπει να

είναι χαμηλής συχνότητας ώστε να μην φιλτράρεται από τους μετασχηματιστές και τα πηνία διανομής (με καταλληλότερα τα σήματα σε υπο-αρμονικές συχνότητες).

Η μέθοδος αυτή έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι των προηγουμένων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις αυξημένης διανεμημένης παραγωγής μέσω αντιστροφέων ισχύος. Δεν υπάρχουν κάποια όρια φορτίου στα οποία θα αποτύχει η αποσύνδεση των αντιστροφέων, δεδομένου ότι η ύπαρξη του σήματος είναι ένδειξη παρουσίας του δικτύου. Παράλληλα δεν απαιτεί κάποια μεταβολή στην ισχύ εξόδου του αντιστροφέα, ούτε μπορεί να κάνει τη λειτουργία των αντιστροφέων επικίνδυνη για την σταθερότητα του δικτύου και την ποιότητα του φορτίου. Αντίθετα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως στοιχείο ελέγχου για τον έλεγχο της σταθερότητας του δικτύου και ως βοηθητικό στοιχείο σε ασταθείς καταστάσεις.

Δεδομένου ότι μπορεί να υλοποιηθεί με σήματα ίδιου τύπου με ήδη χρησιμοποιούμενα στα ηλεκτρικά δίκτυα, μόνο ένας πομπός αρκεί για να καλύψει μια μεγάλη περιοχή διανεμημένης περιοχής. Απ' την πλευρά του αντιστροφέα ένας δέκτης είναι αρκετός να παρεμβληθεί στο σημείο σύνδεσης και τίποτα άλλο.

Δυσμενής θα μπορούσε να είναι η περίπτωση ύπαρξης μεγάλων αρμονικών της τάσεως, οι οποίες ενδεχομένως θα «ξεγελούσαν» τους δέκτες, μπερδεύοντας το φέρον σήμα με αυτές και μη εντοπίζοντας απομονωμένη λειτουργία.

2.3.6.14 Σήμα παραγόμενο από το διακόπτη ζεύξης

Η μέθοδος αυτή ομοίως προϋποθέτει κάποιας μορφής επικοινωνία μεταξύ του δικτύου και του αντιστροφέα. Ωστόσο δεν είναι οι γραμμές της ηλεκτρικής ενέργειας το φυσικό μέσο μεταφοράς του σήματος ελέγχου, αλλά κάποια εξωτερική πηγή. Ο διακόπτης ζεύξης του αντιστροφέα με το δίκτυο είναι εξοπλισμένος με ένα δέκτη ο οποίος και στέλνει σήμα μέσω τηλεφώνου, μικροκυματικής ζεύξης ή άλλου μέσου στον αντιστροφέα. Η συνεχής ύπαρξη αυτού του σήματος είναι ένδειξη κλειστού διακόπτη ενώ η απουσία του, ένδειξη διακοπής.

Η μέθοδος αυτή απαιτεί επιπλέον ακριβό εξοπλισμό και ίσως και ειδικές άδειες για χρήση μικροκυματικών συχνοτήτων σε περίπτωση κεντρικού αναμεταδότη και πολλών αντιστροφέων. Απ' την άλλη, θα μπορούσε να είναι πολύ χρήσιμη για την καλύτερη συνεργασία διανεμημένων γεννητριών και κεντρικού δικτύου, π.χ. σε περιπτώσεις επαναφοράς από κατάρρευση (black start). Οι αντιστροφείς θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την επαναφορά αδύνατων τομέων του δικτύου σε συνεργασία με τις κεντρικές γεννήτριες.

2.3.6.15 Supervisory control and data acquisition (SCADA)

Τα συστήματα ελέγχου SCADA χρησιμοποιούνται ευρέως από τις ηλεκτρικές εταιρίες για τον έλεγχο των δικτύων, την συνεργασία των μονάδων μεταξύ τους και για την υλοποίηση ταχέων χειρισμών.

Η ύπαρξη καταγραφέων τάσης, συχνότητας και άλλων μεγεθών στην πλευρά των αντιστροφέων, είναι απαραίτητη για την διασύνδεση των μονάδων αυτών με ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου όλου του δικτύου. Η ύπαρξη πολλών μονάδων διανεμημένης παραγωγής καθιστά ίσως δαπανηρή την εγκατάσταση μονάδων ελέγχου και διαύλων επικοινωνίας αυτών με ένα κεντρικό σύστημα scada. Απ' την άλλη θα εξασφάλιζε πλήρη εποπτεία του δικτύου, ενώ θα καθιστούσε τις μονάδες αυτές μέρος του δικτύου, αναλαμβάνοντας τον έλεγχο της ένταξης τους και βοηθώντας στην καλύτερη διαχείριση του φορτίου.

2.3.7 Χρόνος ζωής αντιστροφέων ισχύος

Η πολυπλοκότητα της κατασκευής των αντιστροφέων DC/AC, καθιστά αυτούς το πιο ευάλωτο σημείο από τα επιμέρους στοιχεία ενός μικροδικτύου. Μια σειρά από ηλεκτρονικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται, είναι αρκετά επιρρεπή στην αστοχία όταν αυτά λειτουργούν κοντά στις οριακές τους συνθήκες ή έστω με συνεχώς μεγάλα φορτία, καθώς και στα σφάλματα που παρουσιάζονται, ιδιαίτερα από την πλευρά του δικτύου. Στατιστικές μελέτες δείχνουν ότι τα τρανζίστορ ισχύος της γέφυρας PWM, τα βαρίστορ για την προστασία από τις υπερτάσεις και οι πυκνωτές είναι τα στοιχεία που κυρίως παρουσιάζουν τη μικρότερη αντοχή στο χρόνο ή στις εντατικές συνθήκες λειτουργίας. Μέχρι πρόσφατα η τυπική διάρκεια συνεχούς λειτουργίας μέχρι να παρουσιαστεί σφάλμα κυμαινόταν μέχρι το πολύ τα 5 έτη, περίοδος πολύ μικρή αν αναλογιστεί κανείς το κόστος των συσκευών αυτών και το γεγονός ότι εγκαθίσταται για να λειτουργούν για μακροπρόθεσμα χρονικά διαστήματα. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει η τάση από τις εταιρείες ηλεκτρονικών να αυξηθεί η αξιοπιστία των αντιστροφέων, φθάνοντας ένα μέσο όριο των 10 ετών λειτουργίας πριν παρουσιαστεί σφάλμα.

Εκτός από την ποιότητα των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται καθοριστικής σημασίας είναι και η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τον αντιστροφέα ισχύος. Για παράδειγμα, οι αντιστροφείς που έχουν μετασχηματιστή απομόνωσης χαμηλής συχνότητας, είναι πολύ λιγότερο επιρρεπείς στα σφάλματα διαρροής συνεχούς συνιστώσας ρεύματος από το δίκτυο, καθώς απομονώνουν τελείως την πλευρά του DC ηλεκτρικού μέρους από αυτό.

Αντίθετα, προβλήματα ενδέχεται να παρουσιαστούν τόσο στους αντιστροφείς που δεν χρησιμοποιούν καθόλου μετασχηματιστή απομόνωσης, όσο και σε αυτούς που χρησιμοποιούν υψίσυχνους μετασχηματιστές. Οι αντιστροφείς αυτοί είναι πιο επιρρεπείς σε σφάλματα συνεχούς ρεύματος που μπορεί να παρουσιαστούν, τα οποία και μπορούν άνετα να προκαλέσουν την καταστροφή πυκνωτών ή τρανζίστορ.

Σημαντικό ρόλο παίζει εξάλλου και το περιβάλλον στο οποίο εγκαθίσταται ο αντιστροφέας. Από την πλευρά του δικτύου, μια τάση με μεγάλο ποσοστό αρμονικών μπορεί να προκαλεί ανεπιθύμητες καταστάσεις στον αντιστροφέα, το ίδιο μπορεί να συμβαίνει με τυχόν συχνές υπερτάσεις ή βραχυκυκλώματα. Αναπόφευκτά οι οριακές αυτές συνθήκες λειτουργίας όπως μεταφράζονται από τον αντιστροφέα μέχρι να βγει εκτός λειτουργίας από τις ανοχές του, μειώνουν το χρόνο ζωής. Παράλληλα το εξωτερικό περιβάλλον, ιδιαίτερα η αυξημένη θερμοκρασία επηρεάζει καθοριστικά όχι μόνο την απόδοση αυτού, αλλά και τον χρόνο ζωής του, καθώς θερμαίνονται περισσότερο όλα τα ηλεκτρονικά του εξαρτήματα. Γι' αυτό το λόγο και οι πιο εξελιγμένοι αντιστροφείς διαθέτουν έλεγχο μείωσης της ισχύος εξόδου τους με την αύξηση της θερμοκρασίας.

2.4 Συσσωρευτές

Οι συσσωρευτές αποτελούν θα λέγαμε το αδύναμο κρίκο κάθε αυτόνομου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Αυτό διότι ενώ είναι από τα πιο βασικά στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος, ταυτόχρονα είναι το πιο ευαίσθητο από όλα τα υπόλοιπα. Αν και το κόστος τους δεν είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες ή τους αντιστροφείς ισχύος, μπορεί να αποβεί μεγάλο αν δεν γίνεται προσεκτική χρήση τους, με το να μειώνεται δραστικά η αναμενόμενη διάρκεια ζωής τους και να χρειάζονται συνεχώς αντικατάσταση. Μελέτες δείχνουν ότι για ένα διάστημα 20 ετών η δαπάνη για τους συσσωρευτές ανέρχεται στο 55% του κόστους του συστήματος.

2.4.1 Η τεχνολογία των συσσωρευτών μολύβδου

Το χημικό φαινόμενο που συνδέεται με την εμφάνιση διαφοράς δυναμικού μεταξύ ενός μετάλλου και ενός όξινου διαλύματος είναι γνωστό στον άνθρωπο από πολύ παλιά, ενώ ήδη η τεχνολογία των συσσωρευτών μετρά ένα αιώνα ζωής.

Το βασικό μοντέλο συσσωρευτή αποτελείται από δύο πλάκες βυθισμένες σε αραιό διάλυμα θειϊκού οξέος. Η κάθε πλάκα αποτελείται από μία σχάρα σκληρού αντιμονιούχου μολύβδου, αφήνοντας κενά στο εξωτερικό των επιφανειών τους. Στην θετική πλάκα τα κενά της σχάρας είναι γεμισμένα με υπεροξείδιο του μολύβδου, που είναι και η ενεργός ουσία η οποία παίρνει μέρος στην ηλεκτροχημική διαδικασία. Η αρνητική πλάκα έχει στα κενά της σχάρας της πορώδη μόλυβδο, αν και συνήθως αναμειγνύεται με άλλες ουσίες για ανθεκτικότητα. Ανάμεσα στις πλάκες, οι οποίες μπορεί να βρίσκονται πολύ κοντά η μία στην άλλη, παρεμβάλλεται μια αδρανής πλάκα από πορώδες μονωτικό υλικό η οποία δεν επιτρέπει στις πλάκες να έρθουν σε επαφή, αλλά αφήνει το διάλυμα να κυκλοφορεί. Το τελευταίο με τη σειρά του αποτελείται από διάλυμα θειικού οξέος σε αποσταγμένο νερό περιεκτικότητας 1,28 gr/cm^3. Αν και διάλυμα μεγαλύτερης περιεκτικότητας μπορεί να δώσει μεγαλύτερη αγωγιμότητα στα ηλεκτρόνια, δεν χρησιμοποιείται για το λόγο ότι πάνω από αυτό το όριο αρχίζει να γίνεται οξειδωτικό, με αποτέλεσμα να οξειδώνει τις πλάκες του μολύβδου.

Η φόρτιση και εκφόρτιση του συσσωρευτή είναι μια χημική διαδικασία. Όταν γεμίσουμε το δοχείο που βρίσκονται οι πλάκες με το διάλυμα του θειικού οξέος πάνω στις πλάκες σχηματίζεται θειικός μόλυβδος ($PbSO_4$).

Κατά τη φόρτιση των συσσωρευτών πραγματοποιείται η κάτωθι χημική αντίδραση:

$2\ PbSO_4 + 2\ H_2O \rightarrow PbO_2 + 2\ H_2SO_4 + Pb$

Ο θειικός μόλυβδος επιδρά με το νερό και διασπάται, στη μεν θετική πλάκα σε οξείδιο του μολύβδου, στη δε αρνητική σε μεταλλικό μόλυβδο. Συνεπώς κατά τη διάρκεια φόρτισης του συσσωρευτή αυξάνει η πυκνότητα του διαλύματος σε θειικό οξύ και ο συσσωρευτής έχει απορροφήσει τη μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει όταν η πυκνότητα του διαλύματος φτάσει περίπου τα 1,280 gr/cm^3. Αυτός είναι και ο πιο αξιόπιστος δείκτης φόρτισης του συσσωρευτή.

Η αντίστροφη διαδικασία πραγματοποιείται κατά την εκφόρτιση, δίνοντας ηλεκτρόνια στις αγώγιμες πλάκες.

$PbO_2 + 2\ H_2SO_4 + Pb \rightarrow 2\ PbSO_4 + 2\ H_2O$

Ο μεταλλικός μόλυβδος στα άκρα της αρνητικής πλάκας (Pb) οξειδώνεται σε θειικό μόλυβδο (Pb2+) δίνοντας ηλεκτρόνια στο κύκλωμα, ενώ στην θετική πλάκα τα ιόντα Pb4+ (PbO2) ανάγονται προς Pb2+ παίρνοντας ηλεκτρόνια από το κύκλωμα.

Θετική πλάκα: Pb → Pb2+ + 2 e

Αρνητική πλάκα: Pb4+ + 2e → Pb2+

Η τάση του συσσωρευτή μειώνεται κατά την εκφόρτιση φθάνοντας το κατώτατο όριο των 1,93 Volt, όπου ο συσσωρευτής θεωρείται ότι έχει εκφορτισθεί πλήρως.

Οι γνώσεις αυτές είναι θεμελιώδεις για τη σωστή φόρτιση – εκφόρτιση του συσσωρευτή. Κάθε φορτισμένη κυψέλη ενός συσσωρευτή δίνει τάση 2,1 Volt. Για να φορτισθεί όμως πλήρως απαιτείται μια τάση 2,4 Volt. Όταν η φόρτιση ολοκληρωθεί πλήρως και δεν υπάρχει ελεύθερος θειικός μόλυβδος στις σχάρες των πλακών για να ενωθεί με νερό και να σχηματίσει καθαρό μόλυβδο, η ενέργεια που εισέρχεται στο συσσωρευτή προκαλεί ηλεκτρόλυση του νερού.

2.4.2 Φόρτιση του συσσωρευτή

Τα περισσότερα συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται για τη φόρτιση των συσσωρευτών, από το ηλεκτρικό σύστημα των αυτοκινήτων μέχρι τους ελεγκτές φόρτισης σε ηλιακά συστήματα, ελέγχουν την τάση του. Αυτό διότι όπως ειπώθηκε η τάση ανοιχτοκύκλωσης στα άκρα του είναι μια ένδειξη της κατάστασης φόρτισής του. Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας της στάθμης φόρτισης ενός συσσωρευτή σε σχέση με την τάση ανοιχτοκύκλωσης στα άκρα του, καθώς και το ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη του. Η μέτρηση τόσο της τάσης όσο και του ειδικού βάρους πρέπει να γίνονται μόνο σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης των άκρων του στοιχείου.

Κατάσταση φόρτισης (SOC%)	**Τάση ανοιχτοκύκλωσης ανα στοιχείο (volt)**	**Ειδικό βάρος ηλεκτρολύτη (gr/cm^3)**
100%	2,12	1,265
90%	2,08	1,249
80%	2,07	1,233
70%	2,05	1,218
60%	2,03	1,204
50%	2,01	1,190
40%	1,98	1,176
30%	1,96	1,162
20%	1,93	1,148
10%	1,89	1,134
0%	1,75	1,120

***Πίνακας 2.2* - Τάση ανοιχτοκύκλωσης και ειδικό βάρος ηλεκτρολύτη συναρτήσει της στάθμης φόρτισης ενός συσσωρευτή. Οι τιμές του ειδικού βάρους μπορούν να κυμαίνονται κατά 0,15 μονάδες, ανάλογα με τον τύπο του συσσωρευτή και τη θερμοκρασία.**

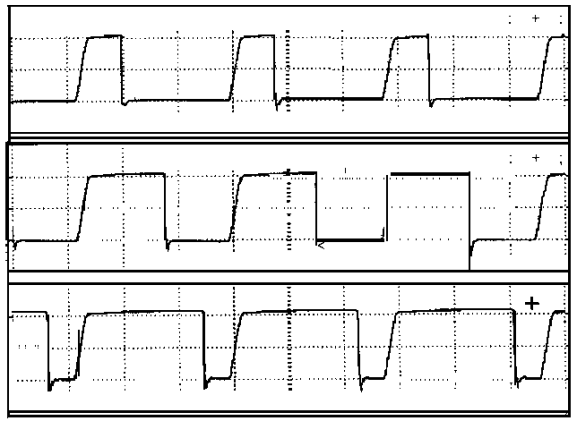
Η φόρτιση του συσσωρευτή μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Σήμερα ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι η φόρτιση με σταθερό ρεύμα, με σταθερή τάση και η φόρτιση με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM).

Σχετικά με τις δύο πρώτες μεθόδους, η φόρτιση περιλαμβάνει τρία στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο (normal charge) ο συσσωρευτής φορτίζεται με ένα σταθερό ρεύμα, η τάση δεν έχει ιδιαίτερη σημασία αρκεί να είναι πάνω από το όριο φόρτισης αυτού, συνήθως 2,1 volt. Καθώς ο συσσωρευτής φορτίζεται, το ρεύμα που απορροφάει μειώνεται και αυξάνεται η τάση στα άκρα του. Σε αυτό το στάδιο ο συσσωρευτής χρειάζεται λίγη ακόμη φόρτιση ώστε να εξασφαλιστεί ότι φορτίζονται πλήρως όλα τα στοιχεία του (full charge). Αυτό σημαίνει ότι για ένα μικρό διάστημα θα πρέπει η τάση του να υπερβεί τα 2,4 volt/κυψέλη.

Όταν ο συσσωρευτής σταματήσει να φορτίζεται η τάση στα άκρα του αρχίζει να πέφτει ώσπου να φτάσει στα 2,1 volts που είναι η τάση πλήρους φόρτισής του. Για να διατηρηθεί σε μια συνεχώς φορτισμένη κατάσταση ένας σωστός ελεγκτής φόρτισης θα πρέπει να εκτελεί το επόμενο διάστημα μια περιοδική φόρτιση συντήρησης (float charge) η οποία έχει ως ανώτατο όριο τα 2,3 volts/κυψέλη και κατώτατο τα 2,1 volts/κυψέλη.

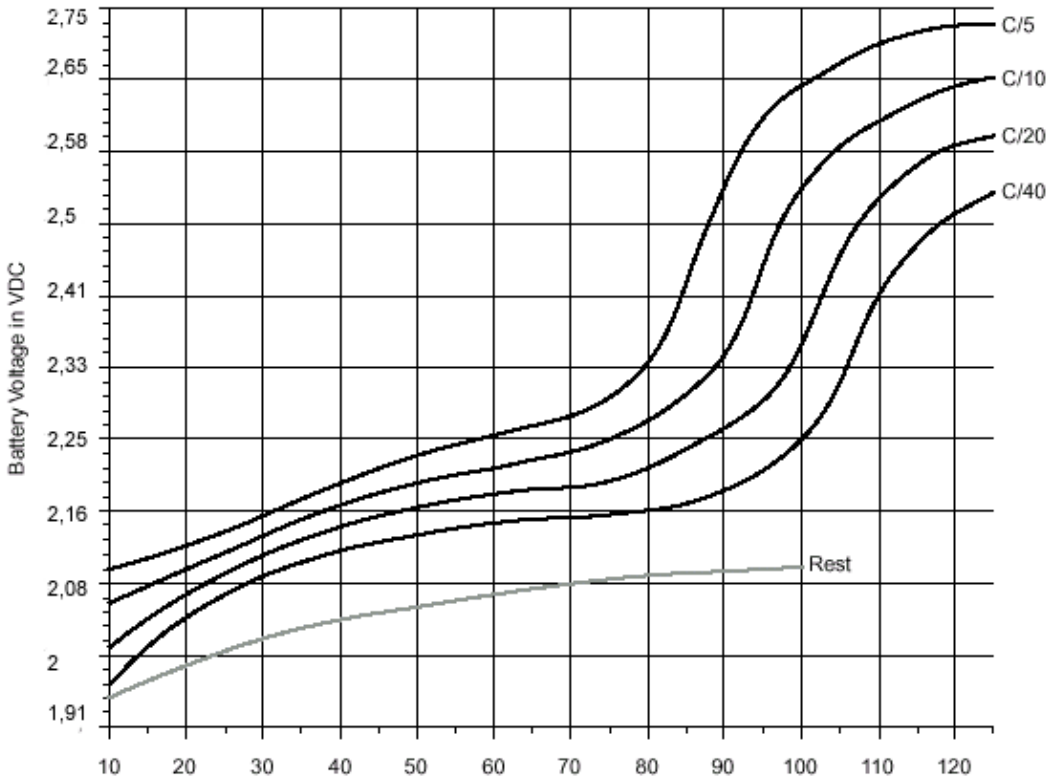
Όταν ένας συσσωρευτής χρησιμοποιείται με συνεχείς βαθιές εκφορτίσεις απαιτείται μια ακόμη διαδικασία βελτιστοποιητικής φόρτισης (equalizing charge). Η φόρτιση αυτή γίνεται έπειτα από συγκεκριμένο αριθμό διαδοχικών φορτίσεων-εκφορτίσεων ή έπειτα από καθορισμένο χρονικό διάστημα. Η διαδικασία αυτή γίνεται αφού έχει φορτιστεί πλήρως ο συσσωρευτής και απαιτεί την παροχή τάσης σε κάθε στοιχείο 2,4-2,5 volt για 1 έως και 5 ώρες. Κατά το διάστημα αυτό πραγματοποιείται ηλεκτρόλυση του νερού στο διάλυμα του θειικού οξέως, οπότε εκλύεται υπό μορφή φυσαλίδων υδρογόνο και οξυγόνο. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη για την αποφυγή σχηματισμού κρυστάλλων στις πλάκες του συσσωρευτή. Να σημειωθεί ότι η ελάττωση του νερού λόγω της ηλεκτρόλυσης μπορεί να αφήσει ακάλυπτες τις πλάκες μολύβδου, γι' αυτό και απαιτείται συχνή συντήρηση των συσσωρευτών με προσθήκη απιονισμένου νερού.

Τελείως διαφορετική είναι η φόρτιση με διαμόρφωση του εύρους των παλμών. Ο συσσωρευτής φορτίζεται συνεχώς με παλμούς τάσης, των οποίων το εύρος μεταβάλλεται σύμφωνα με την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή. Όταν αυτός είναι σε χαμηλή στάθμη φόρτισης, ο ρυθμιστής καθορίζει μεγάλη σχετική διάρκεια αγωγής ώστε να δίνεται μεγάλο ρεύμα. Αντίθετα όσο προχωράει η φόρτιση το εύρος των παλμών μειώνεται ώστε να δίνεται μικρότερο ρεύμα.



Εικόνα 2.36 **- Τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών στην φόρτιση των συσσωρευτών. Μεταβάλλοντας τη σχετική διάρκεια αγωγής, μεταβάλλεται η μέση τιμή του ρεύματος φόρτισης.**

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία του συσσωρευτή αυξάνει κατά τη φόρτισή του. Ιδιαίτερα αν η φόρτιση δεν διακοπεί μετά την πλήρη φόρτισή του, εκτός από την ηλεκτρόλυση του νερού που λαμβάνει μέρος αρχίζει να αυξάνει και η θερμοκρασία αισθητά με αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας ζωής του. Στο παρακάτω διάγραμμα δείχνεται η τάση ανά στοιχείο ενός συσσωρευτή κατά τη διάρκεια της φόρτισής του.

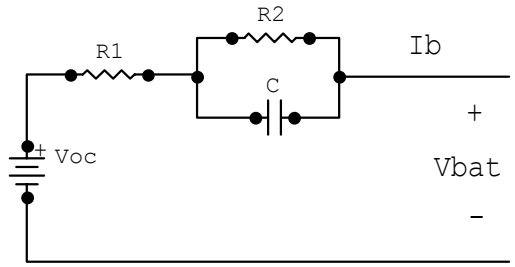


Εικόνα 2.37 **– Τάση δίβολτου στοιχείου μολύβδου – οξέος συναρτήσει του ποσοστού φόρτισης αυτού (SOC%), για διαφορετικά ρεύματα φόρτισης (ρεύμα φόρτισης C/n, όπου C η χωρητικότητα του συσσωρευτή και n ο συνολικός χρόνος φόρτισης). [Πηγή: Homepower#36, p.67]**

2.4.3 Εκφόρτιση συσσωρευτή

Όλοι οι συσσωρευτές παρουσιάζουν μια μικρή εσωτερική σύνθετη αντίσταση. Ένα απλό στατικό ηλεκτρικό ισοδύναμο μοντέλο θα ήταν μια ηλεκτρεγερτική δύναμη σε σειρά με μια εσωτερική αντίσταση R.

Ωστόσο ένα τέτοιο μοντέλο δεν λαμβάνει υπ' όψιν του την μεταβολή της εσωτερικής σύνθετης αντίστασης τόσο με το ρεύμα εκφόρτισης όσο και με τη θερμοκρασία. Ένα πιο κατάλληλο μοντέλο για να περιγράψει τη μεταβαλλόμενη σύνθετη αντίσταση είναι το ισοδύναμο κατά Thevenin.



Εικόνα 2.38 **– Ισοδύναμο κατά Thevenin ενός συσσωρευτή, λαμβάνοντας υπ' όψιν την μεταβαλλόμενη εσωτερική σύνθετη αντίσταση. [Πηγή: Lead-Acid batteries, UMIST)**

Η τάση στους ακροδέκτες του συσσωρευτή είναι:

$$V_{bat} = V_{oc} - I_b * \left[\left(\frac{1}{R2} + \frac{1}{C} \right) + R1 \right]$$

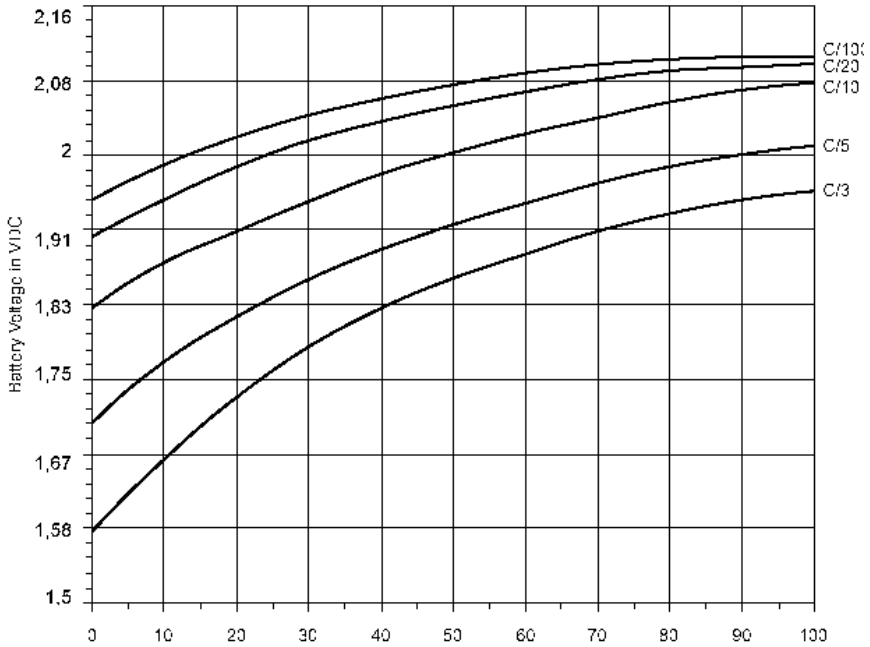
όπου:

- Vbat, η τάση του συσσωρευτή
- Voc, η τάση ανοιχτοκύκλωσης του συσσωρευτή
- R1, η εσωτερική αντίσταση
- R2 και C τα στοιχεία της υπέρτασης του συσσωρευτή

Καθώς ο συσσωρευτής εκφορτίζεται η τιμή της σύνθετης εσωτερικής αντίστασης που καθορίζουν τα στοιχεία R1,R2,C αυξάνει έως και 5 φορές περισσότερο απ' ότι όταν είναι πλήρως φορτισμένος.

Αξιόπιστη μέτρηση της κατάστασης φόρτισης μπορεί να έχει κανείς σταματώντας την εκφόρτιση του συσσωρευτή και μετρώντας την τάση στα άκρα του μετά από λίγο.

Κατά την διάρκεια της εκφόρτισης η οξείδωση των πλακών προχωράει και φτάνει ένα μέγιστο βαθμό όταν η τάση πέσει περίπου στα 1,93 volt ή το ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη φτάσει σε περιεκτικότητα θειικού οξέος τα 1,12 gr/cm^3. Αν και σ' αυτήν την κατάσταση υπάρχει ακόμη ένα 20% ενέργειας αποθηκευμένης, θεωρείται ότι έχει φτάσει σε κατάσταση πλήρους εκφόρτισης διότι περαιτέρω εκφόρτιση έχει ως αποτέλεσμα τη διάβρωση του υλικού των πλακών, και κατά συνέπεια τη δραστική μείωση της διάρκειας ζωής του συσσωρευτή. Γι' αυτό το λόγο ποτέ οι συσσωρευτές δεν πρέπει να εκφορτίζονται περισσότερο από το 80% της χωρητικότητάς τους.



Εικόνα 2.39 **– Τάση δίβολτου στοιχείου μολύβδου - οξέως κατά την εκφόρτιση αυτού συναρτήσει του βαθμού φόρτισης αυτού (SOC%), για διάφορετικές τιμές ρεύματος εκφόρτισης C/n (C χωρητικότητα σε Ah, n συνολικός χρόνος εκφόρτισης σε ώρες). [Πηγή: Homepower# 36, p. 68]**

Κάτι που έχει ιδιαίτερη σημασία για τα μικροδίκτυα που χρησιμοποιούν συσσωρευτές ως βασική πηγή για τη διαχείριση της ενέργειας είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος που μπορούν να παρέχουν και πόσο γρήγορα. Ο ρόλος τους σε ένα μικροδίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να παρομοιαστεί με αυτόν της σύγχρονης γεννήτριας σε ένα μεγάλο δίκτυο, η οποία και μπορεί να απορροφά τις απότομες διακυμάνσεις της ισχύος λόγω της μεγάλης αδράνειας του περιστρεφόμενου δρομέα. Αύξηση του φορτίου της γεννήτριας, προκαλεί μείωση των στροφών της, άρα και της συχνότητας της τάσεως, ωστόσο η μεταβολή αυτή είναι πολύ μικρή λόγω της μεγάλης αδράνειας λόγω περιστροφής.

Στον ηλεκτρονικό αντιστροφέα ισχύος, που δεν διαθέτει αντίστοιχες μηχανικές διατάξεις παραγωγής ενέργειας, καθοριστικής σημασίας είναι η ταχεία απόκριση τόσο των συσσωρευτών όσο και του ηλεκτρονικού κυκλώματος ελέγχου του.

Μελετώντας ξανά το ισοδύναμο κύκλωμα του συσσωρευτή, βρίσκουμε ότι η ισχύς που εξάγεται από αυτόν σε ένα φορτίο R_L είναι: $P = I^2 \cdot R_L$. Σύμφωνα με το θεώρημα μέγιστης μεταβίβασης ισχύος της θεωρίας των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, μέγιστη ισχύς μπορεί να εξαχθεί από τον συσσωρευτή όταν R_L=Ri, όταν δηλαδή η εσωτερική του αντίσταση είναι ίση με του φορτίου. Η μέγιστη αυτή ισχύς θα είναι λοιπόν:

$$P_{\max} = \frac{Ei^2}{4 \cdot Ri}$$

Η μέγιστη αυτή ισχύς εξαρτάται λοιπόν από την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή, αφού όπως εξηγήθηκε η εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή Ri εξαρτάται με τη σειρά της από την κατάσταση φόρτισης αυτού.

Οι απώλειες πάνω στην εσωτερική αντίσταση Ri είναι $P_{Loss} = I^2 \cdot Ri$, οπότε η απόδοση του συσσωρευτή για κάθε κατάσταση φόρτισης θα είναι:

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + Ri}$$

Ένας γενικός εμπειρικός τύπος για το μέγιστο ρεύμα που μπορούν να παρέχουν οι συσσωρευτές είναι $\mathrm{Im}ax = \frac{C}{0{,}05h}$, όπου C η χωρητικότητα τους σε Ah. Όσο μεγαλύτερο είναι αυτό τόσο καλύτερα μπορούν να ανταποκριθούν οι συσσωρευτές σε μια απότομη αύξηση στη ζήτηση ισχύος. Κάτι τέτοιο γίνεται με την παραδοχή ότι η ανταπόκριση των αντιστροφέων που οδηγούν τους συσσωρευτές είναι άμεση.

2.4.4 Χωρητικότητα των συσσωρευτών

Ένας συνήθης συσσωρευτής αποτελείται από πολλά ζεύγη πλακών παράλληλα συνδεδεμένων, δίνοντας τάση 2 Volt. Όταν απαιτείται μεγαλύτερη τάση εξόδου συνδέονται 3, 6, 12 ή και περισσότερα τέτοια ζεύγη πλακών δίνοντας αντίστοιχες τάσεις εξόδου 6, 12, 24 volt.

Η ενέργεια που μπορεί να αποθηκευθεί σε ένα συσσωρευτή μετράται σε αμπερώρια (Ah). Το μέγεθος αυτό είναι το γινόμενο του ρεύματος το οποίο μπορεί να παρέχει ο συσσωρευτής σε ένα εξωτερικό κύκλωμα από σημείο πλήρους φόρτισης, επί των αριθμό των ωρών που προσφέρει αυτό το ρεύμα, μέχρι να εκφορτισθεί πλήρως. Το μέγεθος αυτό συνοδεύεται σχεδόν πάντοτε από τον αριθμό των ωρών τις οποίες διαρκεί η εκφόρτιση του συσσωρευτή. Αυτό καθώς η χωρητικότητα κάθε συσσωρευτή είναι συνάρτηση του ρυθμού εκφόρτισης αυτού. Εξήγηση για αυτή τη σχέση χωρητικότητας – ρυθμού εκφόρτισης δίνει το φαινόμενο Peukert.

Σύμφωνα με το φαινόμενο Peukert, ο χρόνος για την εκφόρτιση ενός συσσωρευτή μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το ρεύμα με το οποίο γίνεται αυτή η εκφόρτιση. Μια εμπειρική σχέση για το φαινόμενο Peukert είναι η εξής:

$$I^n \cdot t = K ,$$

όπου I το ρεύμα εκφόρτισης σε Ampere, t ο χρόνος εκφόρτισης σε sec, και K, n σταθερές που εξαρτώνται από το είδος του συσσωρευτή. Η σταθερά n για πυκνότητες ρεύματος εκφόρτισης μεταξύ $2{,}07*10^2$ και $1{,}65*10^3$ $A*m^{-2}$, παίρνει τιμές μεταξύ 1,39 (θετικά ηλεκτρόδια) και 1,41 (αρνητικά ηλεκτρόδια). Επειδή η σταθερά K κάθε συσσωρευτή εξαρτάται

από τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη, εισάγοντας διόρθωση θερμοκρασίας θα έχουμε:

$$K = K_0 \cdot (1 + a \cdot T),$$

όπου K_0, α σταθερές και Τ η θερμοκρασία.

Στην εξίσωση Peukert μπορεί επιπρόσθετα να εισαχθεί και ένας παράγοντας ώστε να ληφθεί υπ' όψιν και το πάχος των ηλεκτροδίων, οπότε γίνεται:

$$I^n \cdot \left(\frac{t}{d^{(2-n)}} \right) = K \ ,$$

όπου d το πάχος των πλακών του συσσωρευτή.

Συνεπώς για την ολοκληρωμένη εξίσωση Peukert έχουμε:

$$\boxed{I^n \cdot \left(\frac{t}{d^{(2-n)}} \right) = K_0 \cdot (1 + a \cdot T)}$$

Από τη σχέση αυτή είναι φανερή η αλληλεπίδραση μεταξύ ρεύματος εκφόρτισης, χρόνου εκφόρτισης και θερμοκρασίας. Γι' αυτό το λόγο η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή αναφέρεται πάντα συναρτήσει των ωρών που διαρκεί αυτή ή του ρεύματος εκφόρτισης, μετρημένες σε μια θερμοκρασία αναφοράς, συνήθως τους 25 ^{0}C.

Η αποθηκευμένη ενέργεια στον συσσωρευτή μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την χωρητικότητά του σε Ah επί την ονομαστική τάση αυτού.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ονομαστική αυτή χωρητικότητα δεν είναι ποτέ και η πραγματική. Λόγω της εσωτερικής αντίστασης των συσσωρευτών, συνήθως ένα 80% αυτής της ενέργειας μπορεί να εξαχθεί από ένα συσσωρευτή. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη κατά τη σχεδίαση ενός αυτόνομου συστήματος.

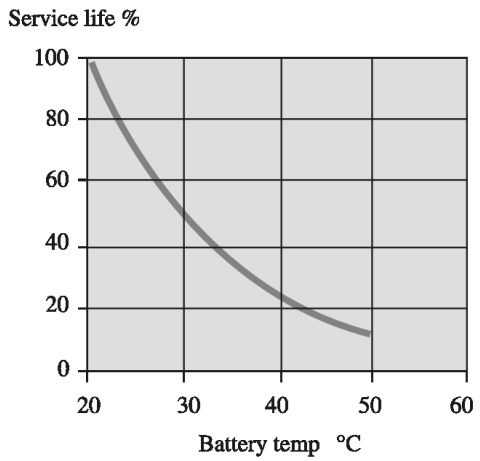
2.4.5 Παράγοντες που επιδρούν στην φόρτιση – εκφόρτιση των συσσωρευτών και στην διάρκεια ζωής τους.

2.4.5.1 Θερμοκρασία

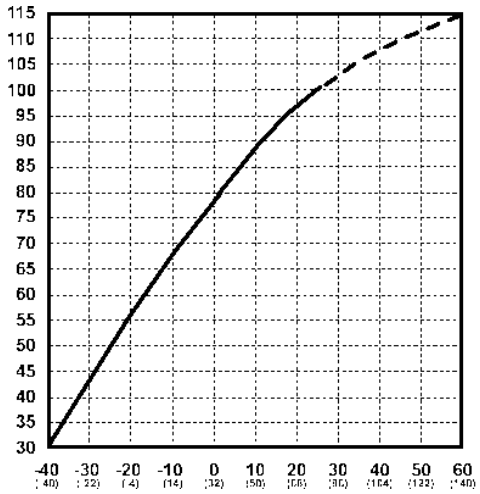
Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις ισχύουν σε μια θερμοκρασία αναφοράς για τις μετρήσεις η οποία είναι 25 ^{o}C. Ωστόσο όλη η συμπεριφορά ενός συσσωρευτή επηρεάζεται σημαντικά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Όταν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία αναφοράς η χωρητικότητα του συσσωρευτή αυξάνει, μειώνεται ωστόσο η διάρκεια ζωής του καθώς επιταχύνονται οι ρυθμοί διάβρωσής του. Αντίθετα σε μικρές θερμοκρασίες (π.χ. το χειμώνα) ναι μεν μειώνεται η συνολική ενέργεια που μπορεί αυτός να αποθηκεύσει αλλά αυξάνεται η διάρκεια ζωής του. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται στην άμεση επίδραση της θερμοκρασίας στην εσωτερική αντίσταση και στην πυκνότητα του ηλεκτρολύτη. Μείωση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη με αποτέλεσμα να δυσκολεύεται η διείσδυση αυτού στους πόρους των ενεργών υλικών των πλακών. Παράλληλα, μειώνεται η αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη (άρα αυξάνεται η εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή), μειώνοντας έτσι και την απόδοση αυτού.

Παρακάτω δίνεται ένα σχεδιάγραμμα του ποσοστού φόρτισης ενός συσσωρευτή συναρτήσει της θερμοκρασίας του. Πολλοί ρυθμιστές φόρτισης συσσωρευτών έχουν ειδικό κύκλωμα που μετρά την θερμοκρασία του συσσωρευτή ώστε να ρυθμίζουν κατάλληλα τη στάθμη φόρτισής του. Η ρύθμιση αυτή αντιστοιχεί σε 0,005 volt/^{o}C, πέρα από το σημείο των 25 ^{o}C. Όσο μειώνεται η θερμοκρασία προσθέτουμε αυτή την τάση στα όρια φόρτισης,

ενώ όσο αυξάνεται τη μειώνουμε. Ο αντιστροφέας sunny island του εργαστηρίου έχει μια τέτοια δυνατότητα. Επίσης φαίνεται η μείωση της διάρκειας ζωής του συσσωρευτή συναρτήσει της θερμοκρασίας λειτουργίας του, έχοντας ως βάση αναφοράς τη διάρκεια ζωής όταν λειτουργεί στους 25 ^{0}C.



Εικόνα 2.40 – **Διάρκεια ζωής συσσωρευτή ως ποσοστό της κανονικής του διάρκειας ζωής στην θερμοκρασία των 20 ^{0}C, συναρτήσει της θερμοκρασίας λειτουργίας**



Εικόνα 2.41 – **Κατάσταση φόρτισης ενός συσσωρευτή (SOC%), συναρτήσει της θερμοκρασίας**

Μια γενική παρατήρηση είναι επίσης ότι σε περιπτώσεις όπου το περιβάλλον στο οποίο θα τοποθετηθεί ο ηλεκτρολύτης είναι πολύ θερμό, συνήθως η αραίωση του ηλεκτρολύτη με νερό είναι λίγο μεγαλύτερη από τη συνήθη των 1,28 gr/cm^3. Αντίθετα σε ψυχρά κλίματα, επιλέγεται πυκνότερο διάλυμα ηλεκτρολύτη, εξασφαλίζοντας παράλληλα κατ' αυτό τον τρόπο και την αποφυγή της πήξης του.

2.4.5.2 Βαθμός εκφόρτισης, συστολή-διαστολή μάζας ηλεκτροδίων

Όπως προαναφέρθηκε η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή επηρεάζεται με το ρεύμα εκφόρτισης. Όταν ο συσσωρευτής εκφορτίζεται με ένα ρεύμα μικρής έντασης μπορεί υπό κανονικές συνθήκες να δώσει το 80% της αποθηκευμένης του ενέργειας. Το ποσοστό αυτό μειώνεται όσο το ρεύμα που απορροφάται μεγαλώνει.

Ένας πρακτικός κανόνας για το κανονικό ρεύμα εκφόρτισης που μπορεί να δίνει ένας συσσωρευτής αναφέρει ότι αυτό πρέπει να μην είναι μεγαλύτερο από C/10, όπου C η χωρητικότητα του συσσωρευτή σε Ah. Ομοίως ο ρυθμός φόρτισης αυτού πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των ορίων C/20 και C/10.

Ωστόσο, ακόμη πιο σημαντικός παράγοντας για τη διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή είναι ο βαθμός στον οποίο εκφορτίζεται (DOD, depth of discharge). Διάφορες τεχνολογίες συσσωρευτών επιτρέπουν ένα βαθμό εκφόρτισης από 10% έως 100%. Ο περιορισμός αυτός έχει να κάνει με τη δομή του συσσωρευτή. Μια μεγάλη εκφόρτιση αυτού, προκαλεί σημαντική μεταβολή στη μάζα των πλακών του, πράγμα που με τη σειρά του συντελεί στη διάβρωση των πλακών και στην επικάθιση μέρους του υλικού που σχηματίζεται από την εκφόρτιση στο κάτω μέρος του δοχείου. Ουσιαστικά, ο συσσωρευτής χάνει μέρος του ενεργού υλικού του μολύβδου που υπάρχει στη σχάρα των πλακών του. Αποτέλεσμα είναι η μείωση τόσο της ζωής όσο και της χωρητικότητάς του, καθώς λιγότερο υλικό παραμένει για να

συμβάλει στη χημική αντίδραση της φόρτισης. Η χωρητικότητά του μειώνεται επίσης και λόγω της αύξησης της εσωτερικής του αντίστασης, αφού μέρος του ρεύματος εκφόρτισης καταναλώνεται πάνω σ' αυτήν. Μεγάλη ποσότητα ιζήματος είναι δυνατόν να προκαλέσει βραχυκύκλωμα των δύο πλακών, καταστρέφοντας έτσι τελείως το στοιχείο.

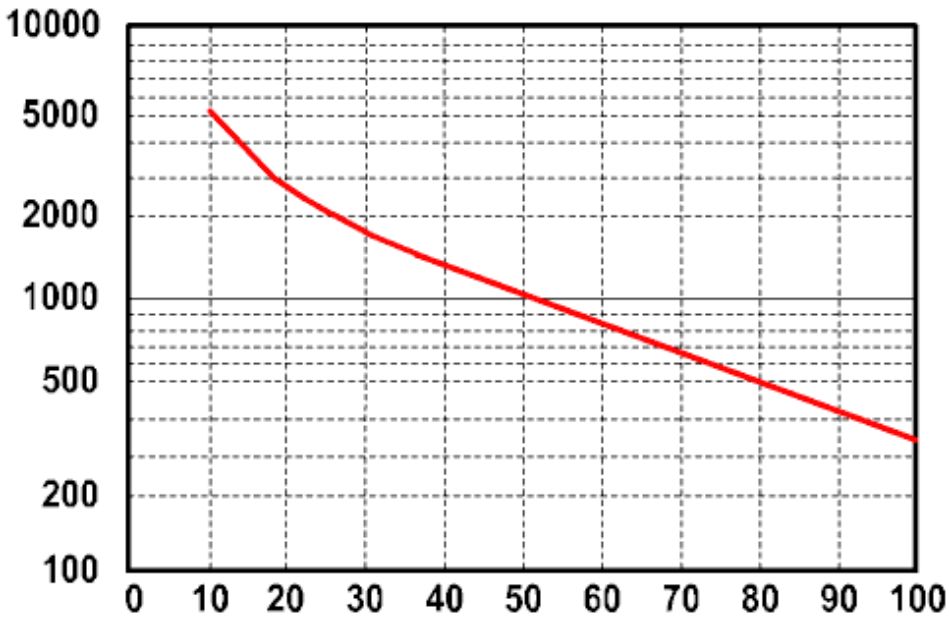
Για την αποφυγή της βαθιάς εκφόρτισης των συσσωρευτών (πάνω από 80%) χρησιμοποιούνται συνήθως στα αυτόνομα ηλιακά συστήματα, ελεγκτές διακοπής της τροφοδοσίας όταν η τάση του συσσωρευτή πέσει κάτω από ένα καθορισμένο σημείο (low voltage disconnect).

Καθοριστικό στοιχείο για το επιτρεπόμενο μέγιστο βάθος εκφόρτισης είναι το πάχος των πλακών. Όσο πιο παχιές είναι αυτές τόσο βαθύτερη εκφόρτιση μπορούν να αντέξουν χωρίς να χάσουν ενεργό ουσία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα συσσωρευτών με μικρό πάχος είναι οι κοινοί συσσωρευτές εκκίνησης που χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα. Επειδή αυτό που χρειάζεται σ' αυτά είναι ένα μεγάλο ρεύμα για σύντομο χρονικό διάστημα προκειμένου να τροφοδοτηθεί η μίζα, κατασκευάζονται με πολλές λεπτές πλάκες, ώστε να υπάρχει μεγάλη επιφάνεια ενεργού ουσίας, άρα και μεγαλύτερη ικανότητα παροχής υψηλού ρεύματος. Αντίθετο παράδειγμα αποτελούν οι συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτροκίνητα οχήματα και τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών, οι οποίες έχουν λίγες και χοντρές πλάκες, ικανές να δώσουν μικρό μεν ρεύμα εξόδου αλλά για πολύ μεγαλύτερο διάστημα σε σύγκριση με των αυτοκινήτων.

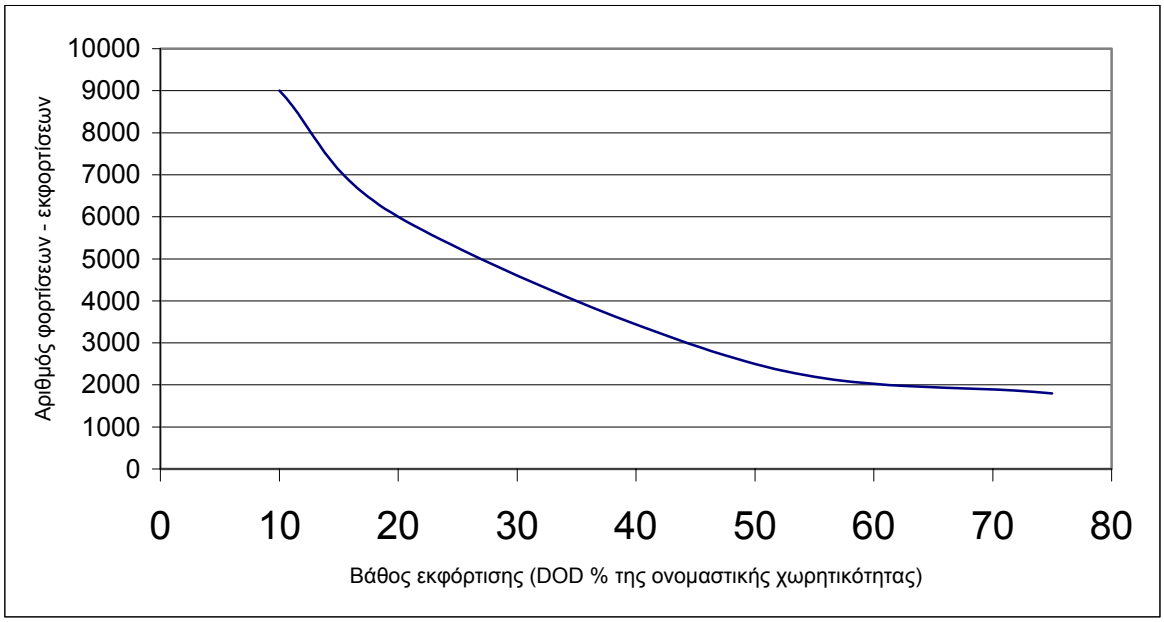
2.4.5.3 Κύκλοι φόρτισης – εκφόρτισης

Στα βασικότερα στοιχεία που χαρακτηρίζουν ένα συσσωρευτή συγκαταλέγεται εκτός από την ονομαστική του χωρητικότητα και το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης, ο μέγιστος αριθμός κυκλικών φορτίσεων-επαναφορτίσεων που μπορεί να δεχθεί μέχρι να χάσει την ονομαστική του χωρητικότητα. Το στοιχείο αυτό αποκτά ύψιστη σημασία στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, καθώς οι συσσωρευτές τροφοδοτούν τις καταναλώσεις όχι μόνο κάθε νύχτα, αλλά και όταν η παραγόμενη ενέργεια από τους συλλέκτες δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση. Έχει λοιπόν μεγάλη σημασία να είναι γνωστός ο αριθμός των πλήρων φορτίσεων-εκφορτίσεων κατά την εγκατάσταση και λειτουργία ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Σε γενικές γραμμές θα λέγαμε ότι ο αριθμός αυτός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το βάθος εκφόρτισης στον οποίο αυτοί πραγματοποιούνται. Όσο μεγαλύτερο είναι αυτό, τόσο μειώνεται ο αριθμός των κύκλων πλήρους φόρτισης-εκφόρτισης που μπορεί να δεχθεί ένας συσσωρευτής. Αυτό διότι, κατά τη διαδικασία εκφόρτισης προκαλείται μια διαστολή μάζας του υλικού, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μέρος αυτού να αποκολλάται και να πέφτει στον πυθμένα του συσσωρευτή. Έτσι μειώνεται σιγά σιγά η ενεργός ουσία των πλακών. Ομοίως σε πολλές περιπτώσεις και η φόρτιση καταπονεί τον συσσωρευτή, ιδιαίτερα όταν αυτός υπερφορτίζεται προκειμένου να φορτίζονται πλήρως όλα τα στοιχεία του. Η συνεπαγόμενη αύξηση της περιεκτικότητας του ηλεκτρολύτη σε στάθμες πάνω από 1,28 gr/cm^3 συμβάλλει στη διάβρωση των πλακών, άρα και στην μείωση της ενεργού τους ουσίας. Επίσης παρατηρούνται φαινόμενα στρέβλωσης των πλακών με την αύξηση της θερμοκρασίας, πράγμα που μπορεί να καταστρέψει τελείως ένα στοιχείο.

Παρακάτω φαίνεται ένα σχεδιάγραμμα των διαδοχικών κύκλων τους οποίους μπορεί να πραγματοποιήσει ένας συσσωρευτής συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης.



Εικόνα 2.42 **- Αριθμός κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης για συσσωρευτές SLI (αυτοκινήτου)**



Εικόνα 2.43 **- Αριθμός εφικτών φορτίσεων – εκφορτίσεων συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης του κάθε κύκλου, για συσσωρευτές τύπου βαθιάς εκφόρτισης (float, tubular plate). Να σημειωθεί ότι το 80% είναι οριακό ποσοστό εκφόρτισης, μετά το οποίο ο χρόνος ζωής μειώνεται απότομα, δηλαδή ο συσσωρευτής καταστρέφεται.**

2.4.6 Άλλα φαινόμενα που επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών

Δεδομένης της μεγάλης ευαισθησίας που παρουσιάζει ο συσσωρευτής ως μια ηλεκτροχημική διάταξη είναι πολύ σημαντικό να καταγραφούν οι πιο συνηθισμένες αιτίες που συμβάλλουν στη μείωση της ζωής του, κυρίως στα αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα.

Ήδη αναφέρθηκε ότι η εκφόρτιση των συσσωρευτών πέρα από την επιτρεπόμενη από τον κατασκευαστή του τιμή, μειώνει δραστικά τη χωρητικότητα και τη ζωή του. Το ίδιο

συμβαίνει όταν ο συσσωρευτής δεν φορτίζεται παραπάνω από τα επιτρεπόμενα όρια. Η πιο συνηθισμένη ωστόσο αιτία αστοχίας είναι η φόρτιση του με μικρότερες τιμές ή η παραμονή του σε επίπεδα χαμηλού βαθμού φόρτισης για μεγάλο διάστημα. Το φαινόμενο αυτό έχει να κάνει με τη **θειίκωση** των πλακών.

Υπό κανονικές συνθήκες, ο θειικός μόλυβδος που δημιουργείται κατά την εκφόρτιση στην επιφάνεια των πλακών έχει άμορφη σύσταση (λεπτή σκόνη) και μετατρέπεται εύκολα σε πορώδη μόλυβδο και υπεροξείδιο του μολύβδου κατά τη φόρτιση. Όταν όμως ο συσσωρευτής έχει χαμηλό βαθμό φόρτισης για διάστημα μεγαλύτερο των 15 περίπου ημερών, ο άμορφος αυτός θειικός μόλυβδος μετατρέπεται αργά σε κρυσταλλικό, και αυτή η διαδικασία ονομάζεται θειίκωση. Ο κρυσταλλικός όμως θειικός μόλυβδος είναι μονωτικό υλικό, οπότε η εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή αυξάνεται πολύ, πράγμα που συνεπάγεται υψηλότερες τιμές τάσης για να φορτιστεί ξανά. Επιπρόσθετα καλύπτει το στρώμα του ενεργού άμορφου θειικού μολύβδου που μπορεί να πάρει μέρος στην αντίδραση, ενώ αυξάνεται ο όγκος των πλακών. Όταν η θειίκωση προχωρήσει πολύ, δύσκολα ο συσσωρευτής μπορεί να ανακτήσει την ονομαστική του χωρητικότητα. Αν δεν έχει προχωρήσει πολύ, μια παρατεταμένη φόρτιση με χαμηλό ρεύμα αλλά μεγαλύτερη τάση από 2,4 volt/στοιχείο, μπορεί να διαλύσει τους κρυστάλλους και να επαναφέρει την ικανότητα αποθήκευσης.

Για την αποφυγή του παραπάνω φαινομένου λοιπόν, συνίσταται η περιοδική φόρτιση των συσσωρευτών (περίπου κάθε ένα μήνα ή 8 βαθιές εκφορτίσεις) με τάση 2,5-2,55 volt/στοιχείο για λίγες ώρες ώστε να διασπούνται τυχόν κρύσταλλοι που έχουν δημιουργηθεί.

Μια σχετικά καινούργια τεχνική είναι η χρήση των λεγόμενων αποθειικωτών (desulfators) για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι desulfators είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα τα οποία συνδέονται στα άκρα των συσσωρευτών στέλνοντας κρουστικούς παλμούς τάσης, που μπορούν να φτάσουν έως και τα 50 volt για ένα συσσωρευτή 12 volt και ρεύματος 1-10 A, οι οποίοι προκαλούν τη σταδιακή διάλυση των κρυστάλλων και την επαναφορά του ενεργού θειικού μολύβδου στο διάλυμα. Η όλη διαδικασία γίνεται σε μοριακό επίπεδο, καθώς η υψηλή συχνότητα των κρουστικών παλμών σε συχνότητες περίπου 1-10 KHz ταλαντώνει τους σχηματιζόμενους κρυστάλλους, έχοντας σαν αποτέλεσμα την σταδιακή διάλυση αυτών. Η διαδικασία αυτή είναι αρκετά αργή και εξαρτάται φυσικά από το ποσοστό της κρυστάλλωσης. Περίοδος ενός μήνα επαναφέρει στην αρχική του κατάσταση ένα συσσωρευτή που δεν έχει καταστραφεί. Εάν εφαρμόζεται μόνιμα αυτή η μέθοδος, ο συσσωρευτής δεν έχει ανάγκη την περιοδική βελτιστοποιητική του φόρτιση.

Άλλη συχνή αιτία μείωσης της χωρητικότητας των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις είναι η καθίζηση του ηλεκτρολύτη (stratification). Καθώς το ειδικό βάρος του θειικού οξέος είναι μεγαλύτερο από αυτό του νερού, με το πέρασμα του χρόνου, έχει την τάση να συγκεντρώνεται προς τον πυθμένα του δοχείου του συσσωρευτή. Αυτό είναι φυσικό φαινόμενο που προκαλείται από τη διαφορά του ειδικού βάρους των δύο υγρών. Αυτό έχει σαν συνέπεια την ανομοιογένεια της περιεκτικότητας σε θειικό οξύ του ηλεκτρολύτη. Μεγάλη περιεκτικότητα (πολύ όξινο) προς το κάτω μέρος, μικρή περιεκτικότητα προς το πάνω. Αυτό έχει σαν συνέπεια όχι μόνο την ανομοιόμορφη φόρτιση του συσσωρευτή, αλλά κυρίως την έναρξη μιας διαδικασίας διάβρωσης του ενεργού υλικού των πλακών η οποία αρχίζει από το κατώτατο σημείο τους, καθώς η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη ξεπερνά την επιτρεπτή τιμή των 1,28 gr/cm^3 μέχρι την οποία δεν διαβρώνει τις πλάκες.

Αντίθετα με την περίπτωση των συσσωρευτών που τοποθετούνται σε κινούμενες εφαρμογές, όπως αυτοκίνητα, σκάφη, οπότε και η ανάδευση του ηλεκτρολύτη γίνεται με την κίνηση του συσσωρευτή, στις ηλιακές επίγειες εφαρμογές οι συσσωρευτές βρίσκονται πάντοτε ακίνητοι, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μηχανική κίνηση που θα μπορούσε να αναδεύσει το διάλυμα.

Την απαραίτητη αυτή ενέργεια πραγματοποιεί η ηλεκτρόλυση του νερού. Με την περιοδική υπερφόρτιση του συσσωρευτή, η πλεονάζουσα ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα στην εσωτερική αντίσταση αλλά και πυροδοτεί την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του νερού. Η διάσπαση του νερού σε οξυγόνο και υδρογόνο προκαλεί την εμφάνιση αναδυόμενων φυσαλίδων στο διάλυμα, η ανοδική κίνηση των οποίων είναι ικανή να αναμειγνύει τον ηλεκτρολύτη. Η τεχνική αυτή είναι ικανοποιητική για λίγες συστοιχίες συσσωρευτών, αν και απαιτεί την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, πολύτιμης τις περισσότερες φορές στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Ένα άλλο μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η επικινδυνότητα που συνδέεται με την έκλυση του εκρηκτικού υδρογόνου, γι' αυτό και οι συσσωρευτές πρέπει να τοποθετούνται σε πάντοτε σε καλά αερισμένους χώρους και να αποφεύγονται οι εστίες φωτιάς κοντά τους. Επίσης η απώλεια νερού που συνεπάγεται η ηλεκτρόλυση του νερού, απαιτεί συχνή παρακολούθηση και συμπλήρωση με αποσταγμένο νερό. Αποτελεί εξίσου συνήθη αιτία βλαβών των συσσωρευτών, η μείωση της στάθμης του ηλεκτρολύτη πράγμα που φέρνει σε επαφή τις πλάκες μολύβδου με τον αέρα. Η ταχεία οξείδωση που πραγματοποιείται απ' τον αέρα προκαλεί αναντικατάστατη βλάβη.

Μια διαφορετική μέθοδος που εφαρμόζεται σε περιπτώσεις πολλών συστοιχιών συσσωρευτών, συνίσταται στην μηχανική ανάδευση του ηλεκτρολύτη με αντλία. Τα στοιχεία επικοινωνούν σε αυτή την περίπτωση υδραυλικά μεταξύ τους, οπότε ένα κλειστό κύκλωμα σωληνώσεων και αντλίας αναλαμβάνει την ανάδευση του ηλεκτρολύτη ανά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα.

2.4.7 Διάφοροι τύποι συσσωρευτών

Τρία διαφορετικά κριτήρια μπορούν να κατατάξουν τους συσσωρευτές που διατίθενται εμπορικά σήμερα αυτά είναι:

- το υλικό των ηλεκτροδίων
- το πάχος και η γεωμετρία των πλακών
- το υλικό του ηλεκτρολύτη

Το υλικό με το οποίο κατασκευάζονται είναι καθοριστικής σημασίας για τη διάρκεια ζωής του συσσωρευτή και το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης. Τυπικές υλοποιήσεις πλακών μόνο με μόλυβδο δεν προσφέρουν μεγάλη διάρκεια ζωής καθώς ο μόλυβδος δεν έχει μεγάλη μηχανική αντοχή. Συχνές φορτίσεις – εκφορτίσεις μεταβάλλουν τον όγκο του με αποτέλεσμα να διαβρώνεται ή να λυγίζει. Μεγαλύτερη ανθεκτικότητα επιτυγχάνεται αν χρησιμοποιηθούν στις πλάκες κράματα μολύβδου με ασβέστιο ή αντιμόνιο.

Το πάχος των πλακών είναι καθοριστικής σημασίας για το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης. Συσσωρευτές με λεπτές πλάκες όπως αυτοί των αυτοκινήτων, δεν αντέχουν εκφορτίσεις μεγαλύτερες από 10% καθότι έχουν μικρές ποσότητες ενεργού υλικού στη μεγάλη τους επιφάνεια. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται μεγάλη επιφάνεια για την παραγωγή μεγάλου ρεύματος. Αντίθετα συσσωρευτές με χοντρές πλάκες αντέχουν εκφορτίσεις μέχρι και 80%.

Σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις αυτό που απαιτείται είναι μια σταθερή τιμή ρεύματος για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση χοντρών αλλά λίγων πλακών σε κάθε στοιχείο.

Το υλικό επίσης του ηλεκτρολύτη παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών. Οι συσσωρευτές ανοιχτού τύπου με ηλεκτρολύτη διάλυμα θειικού οξέος είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος συσσωρευτών. Έχουν μεγάλες ανοχές στην υπερφόρτωση αλλά απαιτούν συχνή συντήρηση.

Διάλυμα θειικού οξέος χρησιμοποιούν επίσης και οι συσσωρευτές κλειστού τύπου (valve regulated). Σε αυτή την περίπτωση το υδρογόνο και το οξυγόνο που παράγονται από την ηλεκτρόλυση επανασυνδέονται στο εσωτερικό του συσσωρευτή. Ωστόσο, δεν συνίσταται η υπερφόρτωση αυτού του τύπου συσσωρευτών πάνω από τα 2,35 volt/στοιχείο.

Διαφορετική τεχνολογία χρησιμοποιούν οι συσσωρευτές με gell. Οι gell-cell συσσωρευτές είναι κλειστού τύπου, όπου κατά τη διάρκεια κατασκευής τους τοποθετείται σε ζεστό ηλεκτρολύτη διοξείδιο του πυριτίου. Αυτό στη συνέχεια παγώνει και πήζει τον ηλεκτρολύτη. Παράλληλα αναμιγνύεται και μικρή ποσότητα φωσφορικού οξέος, πράγμα που βοηθά στην βαθιά εκφόρτιση των συσσωρευτών μην επιτρέποντας την οξείδωση των πλακών. Ωστόσο και αυτοί οι συσσωρευτές είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι κατά τη διαδικασία φόρτισής τους. Μια τυχαία υπερφόρτιση πάνω από 2,4 volt/cell θα προκαλέσει τη δημιουργία φυσαλίδων στον πηχτό ηλεκτρολύτη και καταστροφή του συσσωρευτή.

Ομοίως κλειστού τύπου είναι και οι συσσωρευτές που περιέχουν τον ηλεκτρολύτη σε ίνες βορίου – πυριτικού άλατος (Absorbed glass mat). Αν και αυτός ο τύπος συσσωρευτών είναι ευαίσθητος στην υπερφόρτωση, έχει την ικανότητα επανασύνδεσης του υδρογόνου και του οξυγόνου που παράγεται από την ηλεκτρόλυση στο εσωτερικό του. Έτσι δεν θέλουν καθόλου συντήρηση, ούτε είναι πιθανή η διαρροή του ηλεκτρολύτη, ακόμη κι αν σπάσουν.

Τύποι συσσωρευτών

- κοινοί συσσωρευτές εκκίνησης (SLI, starting-lighting-ignition). Οι κοινοί συσσωρευτές εκκίνησης που χρησιμοποιούνται σε οχήματα, αν και έχουν χωρητικότητες από 40 έως 300 Ah, δεν είναι ανθεκτικοί σε μεγάλα βάθη εκφόρτισης, παρά μόνο μέχρι 10%. Αυτό γιατί η λειτουργία τους δεν προορίζεται για συνεχή παροχή ενέργειας, αλλά για την παροχή μεγάλου ρεύματος για ένα σύντομο χρονικό διάστημα, για την εκκίνηση του οχήματος. Η διαδικασία αυτή δεν εκφορτίζει τον συσσωρευτή περισσότερο από 5%. Η διάρκεια ζωής τους είναι μικρή καθότι είναι κατασκευασμένες από πολύ φθηνά κράματα μολύβδου.
- Συσσωρευτές μολύβδου-αντιμονίου. Η προσθήκη αντιμονίου (σε μικρές περιεκτικότητες) στις πλάκες μολύβδου προσδίδει μεγάλη μηχανική αντοχή, πράγμα που επιτρέπει μεγάλες εκφορτίσεις. Παράλληλα αυξάνεται και ο χρόνος ζωής. Συνήθως οι συσσωρευτές μολύβδου – αντιμονίου έχουν μεγάλο πάχος πλακών πράγμα που επιτρέπει εκφορτίσεις έως και 80%. Χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα, ανυψωτικά μηχανήματα και φυσικά στις εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών. Συνήθως αποτελούνται από ανεξάρτητα στοιχεία των 2 volt τα οποία συνδέονται σε σειρά για να δώσουν την επιθυμητή τάση. Είναι πολύ ανθεκτικοί και στην υπερφόρτιση και μπορούν να δώσουν πάνω από 1200 κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης με βάθος 80%. Επίσης δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από την άνοδο της θερμοκρασίας, καθώς έχουν μεγάλη τάση για ηλεκτρόλυση.
- Μολύβδου – ασβεστίου: οι συσσωρευτές αυτοί περιέχουν ασβέστιο στις πλάκες μολύβδου, υλικό που προσδίδει ομοίως κάποια μηχανική αντοχή. Επιτρέπουν ωστόσο μικρότερα βάθη εκφόρτισης μέχρι 25%, ενώ έχουν και μικρότερη διάρκεια ζωής. Βασικά τους πλεονεκτήματα είναι ο χαμηλός ρυθμός αυτό-εκφόρτισης και η μικρή τάση τους για ηλεκτρόλυση του νερού, γεγονός που συμβάλει στη μειωμένη ανάγκη συντήρησης.
- Μικτοί μολύβδου –ασβεστίου- αντιμονίου: Είναι συνήθως συσσωρευτές ανοιχτού τύπου, με χωρητικότητες μεγαλύτερες από 200 Ah. Αποτελούνται από σωληνωτές πλάκες, η μεν θετική από κράμα μολύβδου-ασβεστίου, η δε αρνητική από κράμα μολύβδου-αντιμονίου. Έχουν το πλεονέκτημα της μεγάλης διάρκειας ζωής, του μεγάλου βάθους εκφόρτισης αλλά και της μειωμένης ροπής για ηλεκτρόλυση του νερού λόγω του ασβεστίου.

- Νικελίου-καδμίου: Αποτελούνται από θετικές πλάκες νικελίου υδροξυλείου (NiO(OH)) και αρνητικές από κάδμιο (Cd). Ο ηλεκτρολύτης τους είναι διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH). Έχουν σημαντικές ικανότητες, όπως αντοχή σε βαθειές εκφορτίσεις έως και 100%, μεγάλη διάρκεια ζωής, αντοχή στην υπερφόρτιση και απαιτούν λίγη έως καθόλου συντήρηση. Ωστόσο το υψηλό κόστος τους τις κάνει απαγορευτικές για χρήση σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα.

2.4.8 Οξειδοαναγωγικοί συσσωρευτές (flow batteries)

Τελευταία λέξη στην τεχνολογία των συσσωρευτών αποτελούν οι οξειδοαναγωγικοί συσσωρευτές. Οι συσσωρευτές αυτοί αποτελούν ένα συνδυασμό της τεχνολογίας των επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών και των κυψελών καυσίμου. Ενώ οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια αν τροφοδοτηθούν με ένα καύσιμο και ένα οξειδωτικό μέσο, οι συσσωρευτές αυτοί μπορούν να παράγουν ηλεκτρισμό αν τροφοδοτηθούν με φορτισμένο ηλεκτρολύτη. Χρησιμοποιούν υλικά πολυσουλφιδίων και βρομιδίων, ενώ πειραματικές διατάξεις έχουν κατασκευαστεί με ισχύς από 5-100 KW. Ήδη κατασκευάζεται σταθμός με οξειδοαναγωγικούς συσσωρευτές συνολικής χωρητικότητας 120MWh, ικανός να παρέχει ισχύ αιχμής 14,75 MW.

2.4.9 Συσσωρευτές για μικροδίκτυα

Όπως εύκολα μπορεί κανείς να καταλάβει από τις προηγούμενες παραγράφους, οι συσσωρευτές ναι μεν είναι μια εύχρηστη και αποδοτική πηγή αποθήκευσης της ενέργειας, ωστόσο η ικανότητα τους δεν μπορεί να ξεπεράσει κάποια όρια. Αφ' ενός το υψηλό κόστος και αφετέρου η μικρή σχετικά διάρκεια ζωής δεν επιτρέπουν τη χρήση τους ως βασικό εξυπηρετητή μεγάλων φορτίων. Για τα μικροδίκτυα η λύση των συσσωρευτών βαθιάς εκφόρτισης (ανοιχτού τύπου, χαμηλού αντιμονίου) μπορεί να είναι μια συμφέρουσα λύση για την αποθήκευση της ενέργειας και την διαχείριση της ισχύος αλλά μέχρι κάποιου ορίου.

Εν συγκρίσει με τους υπόλοιπους τύπους συσσωρευτών που αναφέρθηκαν, ο μεγάλος χρόνος ζωής τους, η ικανότητα τους να εκφορτίζονται βαθιά και το γεγονός ότι όλα τα υλικά τους είναι πλήρως ανακυκλώσιμα καθιστά αυτόν τον τύπο συσσωρευτών εφικτή λύση για πολλά μικροδίκτυα της τάξης των λίγων KW. Μεγαλύτερες απαιτήσεις φορτίων είναι καλύτερα να εξυπηρετούνται από γεννήτριες ντίζελ, μικροστροβίλους ή κυψέλες καυσίμου, μονάδες δηλαδή που έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και παραγωγική ικανότητα ισχύος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ

3.1 Φωτοβολταϊκοί συλλέκτες

Στο εργαστήριο είναι εγκατεστημένοι 10 συλλέκτες, οι οποίοι με τη σειρά τους περιέχουν 36 στοιχεία.

Η μέγιστη ισχύς κάθε συλλέκτη είναι 110 Wp, η δε τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι 21,6 volt, οπότε αυτά συνδεδεμένα σε σειρά δίνουν συνεχή τάση 180 volt.

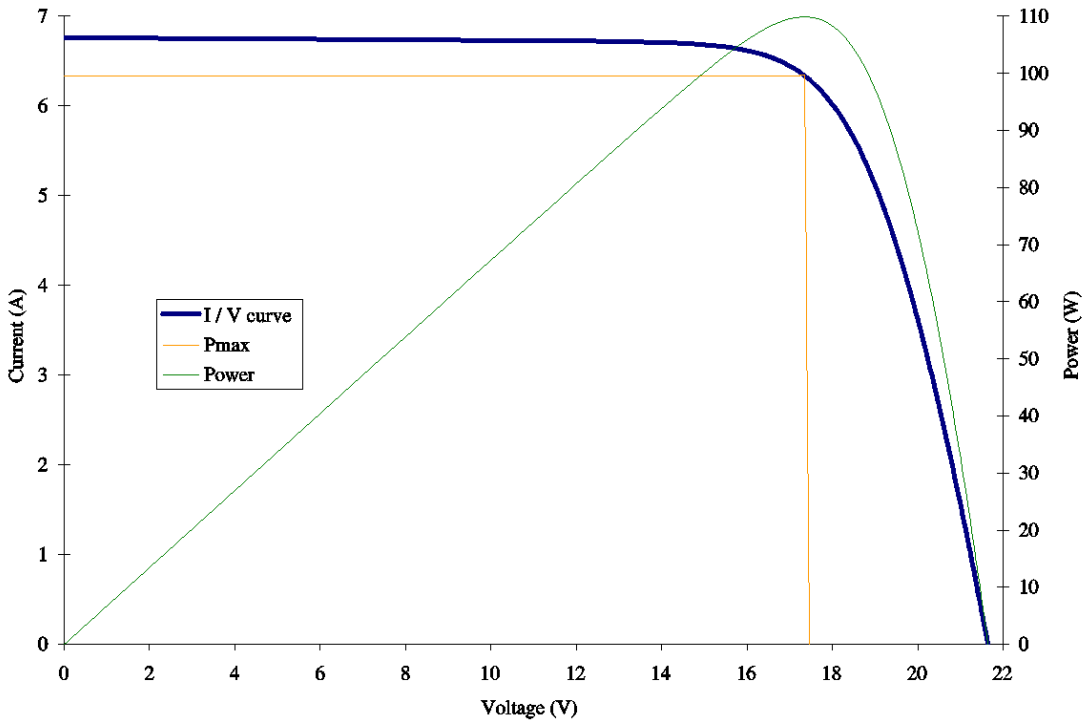
Τα συγκεκριμένα στοιχεία, ισπανικής κατασκευής, είναι από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Τα στοιχεία μονοκρυσταλικού πυριτίου έχουν τη μεγαλύτερη απόδοση, περίπου 15%. Άλλες τεχνολογίες ευρέως διαδεδομένες είναι του πολυκρυσταλλικού και του άμορφου πυριτίου.

Η μέθοδος κατασκευής είναι αυτή που διαφοροποιεί τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου τόσο στην απόδοση όσο και στο κόστος παραγωγής.

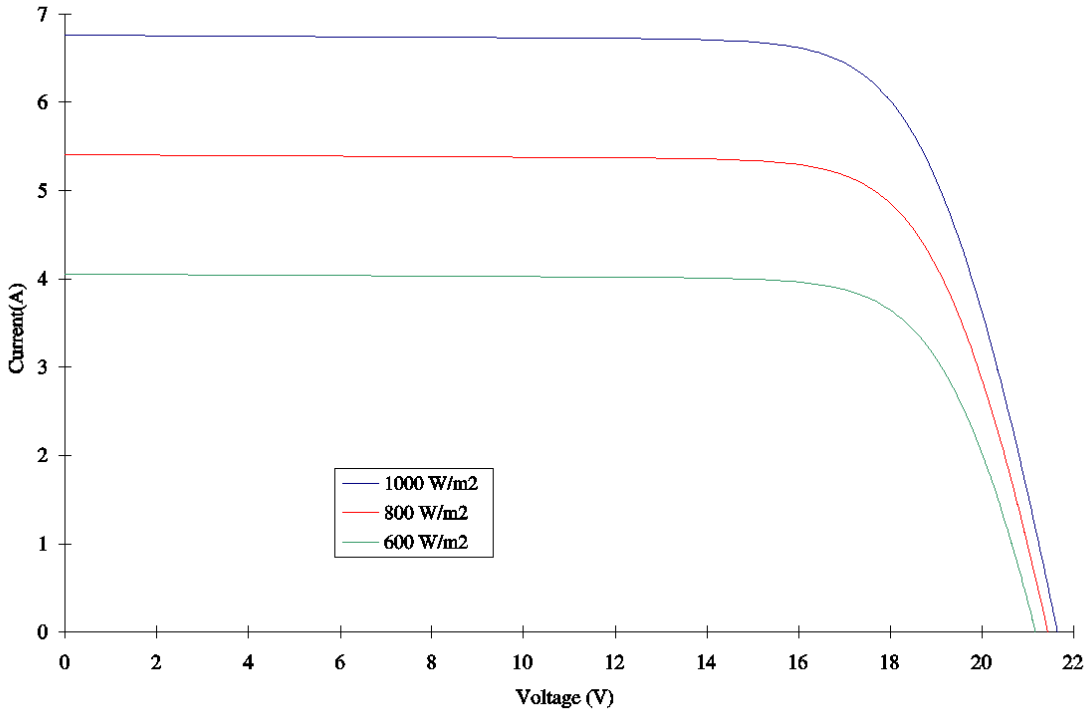
ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Διαστάσεις	1310*654*39,5 mm
Βάρος	11,5 κιλά
Αριθμός εν σειρά κυψελών	36
Αριθμός κυψελών εν παραλλήλω	2
Αναφορά μετρήσεων	NOCT (800 W/m^2, 25 ^{o}C, AM 1,5)
ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	(μετρήσεις σε συνθήκες1000 w/m^2, 25 ^{o}C, AM 1.5)
Ονομαστική τάση λειτουργίας	12 volt
Μέγιστη ισχύς	110 Wp +- 10%
Ρεύμα βραχυκύκλωσης Isc	6,67 A
Τάση ανοιχτοκύκλωσης Voc	21,6 Volt
Ένταση στη μέγιστη ισχύ Imax	6,32 A
Τάση στη μέγιστη ισχύ Vmax	17,4 volt
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Στοιχεία	Μονοκρυσταλλικού πυριτίου, με αντιανακλαστική επίστρωση
Επαφές	Ενισχυμένες επαφές σε κάθε στοιχείο για αξιοπιστία του κυκλώματος
Κάλυψη	EVA(ethylene vinyl acetate)
Εμπρόσθια όψη	Ενισχυμένο γυαλί με βελτιωμένη μετάδοση φωτός
Πλαίσιο	Ανοδιωμένο αλουμίνιο
Κιβώτια επαφών	IP65 με ενσωματωμένες διόδους παράκαμψης
Ακροδέκτες γείωσης	ναι
Καλώδια επαφών	4-10 mm^2

Πίνακας 3.1 **– Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πλαισίων του μικροδικτύου**

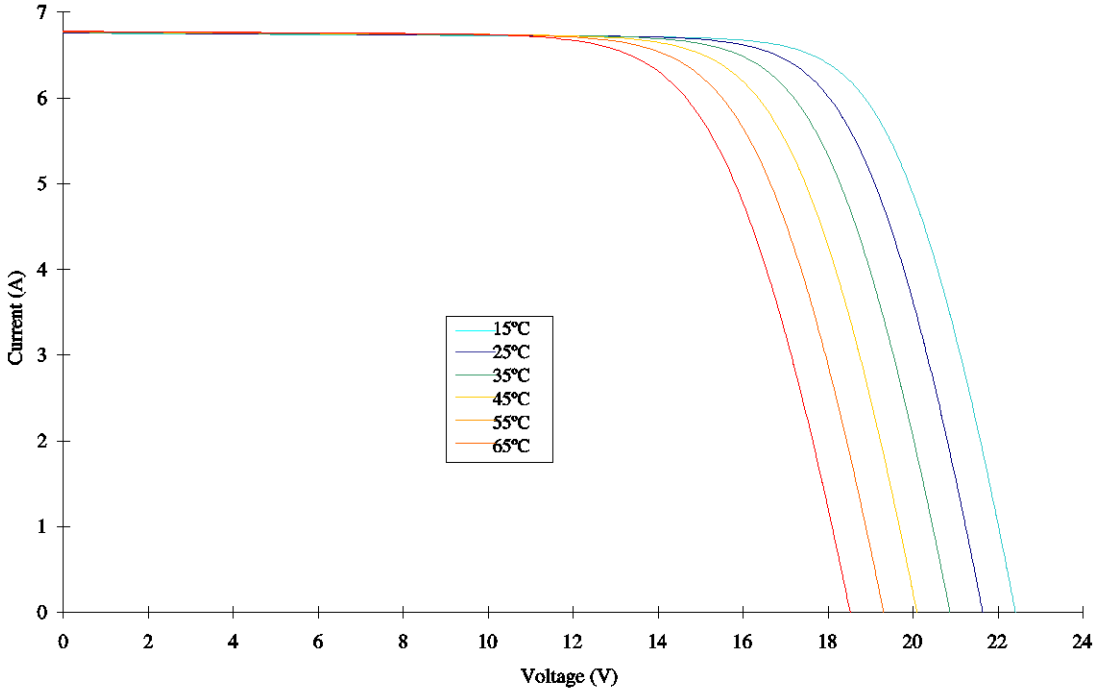
Παρακάτω δίνονται και τα χαρακτηριστικά διαγράμματα I-V, ισχύος – θερμοκρασίας και ισχύος – ηλιακής ακτινοβολίας για τα συγκεκριμένα φ/β πλαίσια.



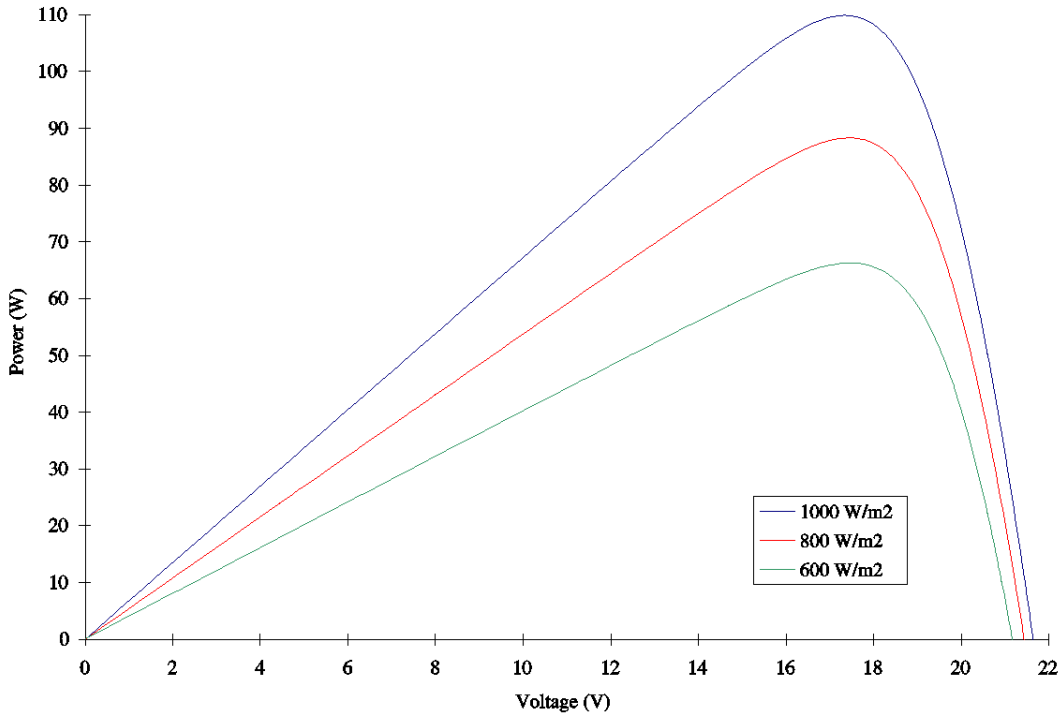
Εικόνα 3.1 – **Χαρακτηριστική I-V ενός φ/β πλαισίου ISOFOTON 110Wp μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Διακρίνεται το σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου Pmax (17.4V, 6.32A). Η καμπύλη αυτή ισχύει για συνθήκες 1000W/m^2 ηλιακής ακτινοβολίας, 1,5AM και 25^{0}C θερμοκρασία**



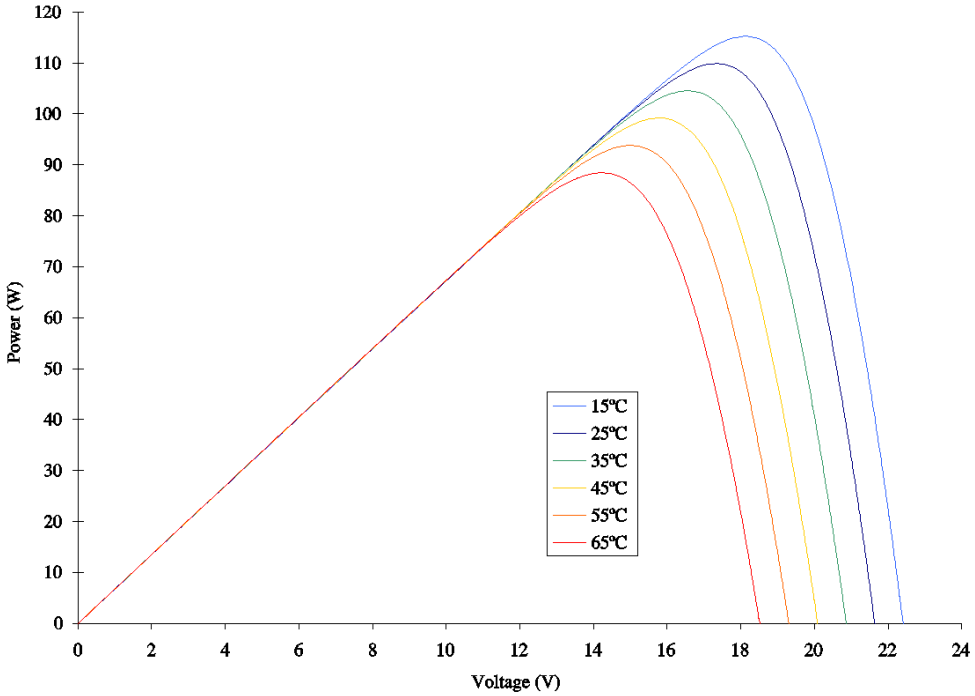
Εικόνα 3.2 – **Εξάρτηση της I-V χαρακτηριστικής του πλαισίου από την ηλιακή ακτινοβολία**



Εικόνα 3.3 **– Εξάρτηση της I-V χαρακτηριστικής από την θερμοκρασία του πλαισίου. Με αύξηση αυτής, προκαλείται μείωση της τάσης εξόδου για συγκεκριμένη τιμή του ρεύματος εξόδου.**



Εικόνα 3.4 – Καμπύλη ισχύος εξόδου (γινόμενο V*I) των φωτοβολταϊκών του μικροδικτύου συναρτήσει της τάσης εξόδου, για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας. Είναι φανερή η μεγάλη επίδρασης αυτής στην απόδοση του φωτοβολταϊκού.



Εικόνα 3.5 – Καμπύλες ισχύος εξόδου ενός φωτοβολταϊκού του μικροδικτύου συναρτήσει της τάσης εξόδου, για διάφορες θερμοκρασίες λειτουργίας. Για τιμές μετά τα 12V, υπάρχει μεγάλη εξάρτηση της ισχύος εξόδου από την θερμοκρασία.

3.2 SUNNY BOY 1100 – Αντιστροφέας σύνδεσης των φωτοβολταϊκών γεννητριών με το ηλεκτρικό δίκτυο (grid-tie inverter)

Ο Sunny boy 1100 grid-tie inverter, είναι ένας αντιστροφέας για τη διασύνδεση φωτοβολταϊκών γεννητριών με ένα δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης το οποίο υφίσταται έτσι κι αλλιώς. Στην ίδια σειρά υπάρχουν αντιστροφείς ισχύος 700 έως 2500 watt.

Το συγκεκριμένο μοντέλο που έχει εγκατασταθεί στο εργαστήριο ΣΗΕ έχει τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

Τεχνολογία αντιστροφέα	πραγματικού ημιτόνου, πηγής ρεύματος, υψηλής συχνότητας διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM)
Ονομαστική AC τάση εξόδου	213-260 volt ac (standard 240)
Ονομαστική συχνότητα εξόδου	49,3 – 50,5 Hz
DC τάση εισόδου	129-400 volt dc
Τάση για μέγιστη ισχύς εξόδου (MPPT)	145 - 400 Volt DC
Μέγιστη ισχύς εισόδου (dc τάσης)	1440 watt
Μέγιστη ισχύς εξόδου (240 volt ac)	1100 watt
Ονομαστική ισχύς εξόδου	1000 watt
Αρμονική παραμόρφωση ρεύματος THD	Μικρότερη από 4%
Συντελεστής ισχύος	1
Μέγιστη απόδοση αντιστροφέα	93%
Ψύξη	Φυσική απαγωγή (χωρίς ανεμιστήρα)
Τάση εισόδου για έναρξη λειτουργίας	180 volt dc
Μέγιστο ρεύμα εξόδου AC	4,6 Ampere
Μέγιστο ρεύμα εισόδου DC	9,5 Ampere
Κυμάτωση DC τάσης	Μικρότερη από 10%
Κατανάλωση ισχύος	0 watt τη νύχτα, μικρότερη από 4 watt σε λειτουργία, μικρότερη από 0,1 watt σε λειτουργία stand by
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	45 ^{o}C

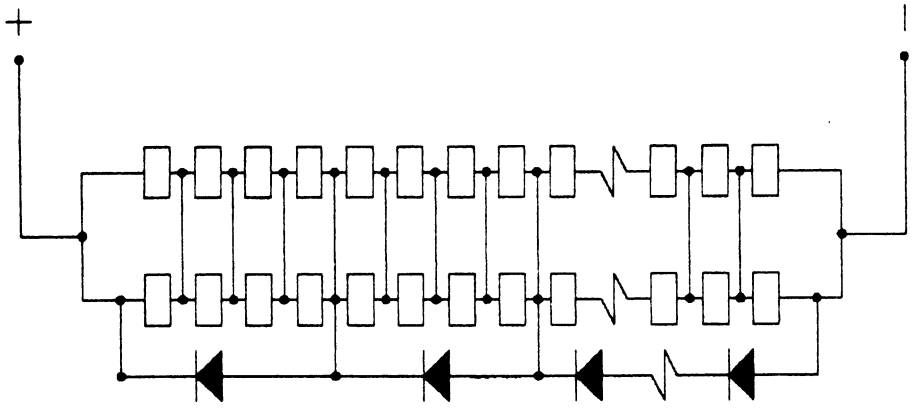
Πίνακας 3.2 **– Τεχνικά χαρακτηριστικά αντιστροφέα φωτοβολταϊκών του μικροδικτύου**

Ο Sunny boy είναι ένας αντιστροφέας ισχύος DC/AC πηγής έντασης. Στην είσοδό του συνδέεται η φωτοβολταϊκή γεννήτρια, μια συστοιχία φωτοβολταϊκών της οποίας η τάση πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των 145 και 400 volt. Για να επιτευχθεί αυτό το επίπεδο τάσης απαιτείται φυσικά η εν σειρά σύνδεση αρκετών φ/β πλαισίων ώστε να δώσουν την απαιτούμενη τάση. Στο εργαστήριο έχουν συνδεθεί σε σειρά τα 10 πλαίσια, δίνοντας μια τάση εξόδου από 120 έως 210 volt, ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία και την απορροφούμενη ενέργεια από το δίκτυο. Από την πλευρά της εξόδου ο αντιστροφέας είναι μόνιμα συνδεδεμένος σε ένα εν λειτουργία δίκτυο χαμηλής τάσης, είτε αυτό είναι το μικροδίκτυο του εργαστηρίου, είτε το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Ο αντιστροφέας παρακολουθεί συνεχώς την τάση εισόδου του και την τάση εξόδου του. Όταν στην μεν τάση εξόδου μετρήσει την ονομαστική τάση που του έχει οριστεί και την συχνότητα στα επιθυμητά όρια, είναι ανά πάση στιγμή έτοιμος να λειτουργήσει μετατρέποντας την τάση εισόδου των φ/β σε εναλλασσόμενη. Αυτό συμβαίνει όταν ο αντιστροφέας μετρήσει στην πλευρά εισόδου του τάση μεγαλύτερη των 180 Volt, ώστε να εξασφαλίσει ότι δεν θα υπάρχουν συνεχείς

τερη των 180 Volt, ώστε να εξασφαλίσει ότι δεν θα υπάρχουν συνεχείς διακοπές της διαδικασίας. Απαραίτητη προϋπόθεση για την έναρξη της λειτουργίας του είναι επίσης να μην μετράει αντίσταση εξόδου μεγαλύτερη από 1,25 Ohm (λειτουργία που έχει απενεργοποιηθεί στο εργαστηριακό μικροδίκτυο).

Η μέχρι τώρα συνήθης κατασκευή των αντιστροφέων ισχύος DC/AC για φωτοβολταϊκά, είχε ως κύριο γνώρισμα της μικρή τάση εισόδου στην DC πλευρά, ώστε πολλά φωτοβολταϊκά να μπορούν να συνδεθούν παράλληλα στην είσοδο του αντιστροφέα καθώς και συσσωρευτές 12 volt. Αυτό το σχήμα ωστόσο, απαιτεί μεγάλες διατομές καλωδίων διασύνδεσης των φωτοβολταϊκών με τον αντιστροφέα, ώστε να αποφεύγονται οι απώλειες λόγω των μεγάλων ρευμάτων που παράγονται αθροιστικά από τους συλλέκτες. Οι αυξημένες αυτές απαιτήσεις καλωδίωσης συνεπάγονται ένα σημαντικό κόστος ιδιαίτερα όταν πρόκειται για αρκετές συστοιχίες φωτοβολταϊκών, όπως και αναπόφευκτες ωμικές απώλειες. Η κατάσταση είναι τελείως διαφορετική με το συγκεκριμένο είδος αντιστροφέα, όπου τα φωτοβολταϊκά συνδέονται όλα σε σειρά δίνονταν μεν μια υψηλή τάση (η οποία φυσικά μπορεί να είναι θανατηφόρα), αλλά περιορίζοντας το ρεύμα σε λίγα Ampere. Η διασύνδεση των φωτοβολταϊκών μεταξύ τους μπορεί να γίνει με απλά καλώδια διατομής 2,5 mm.

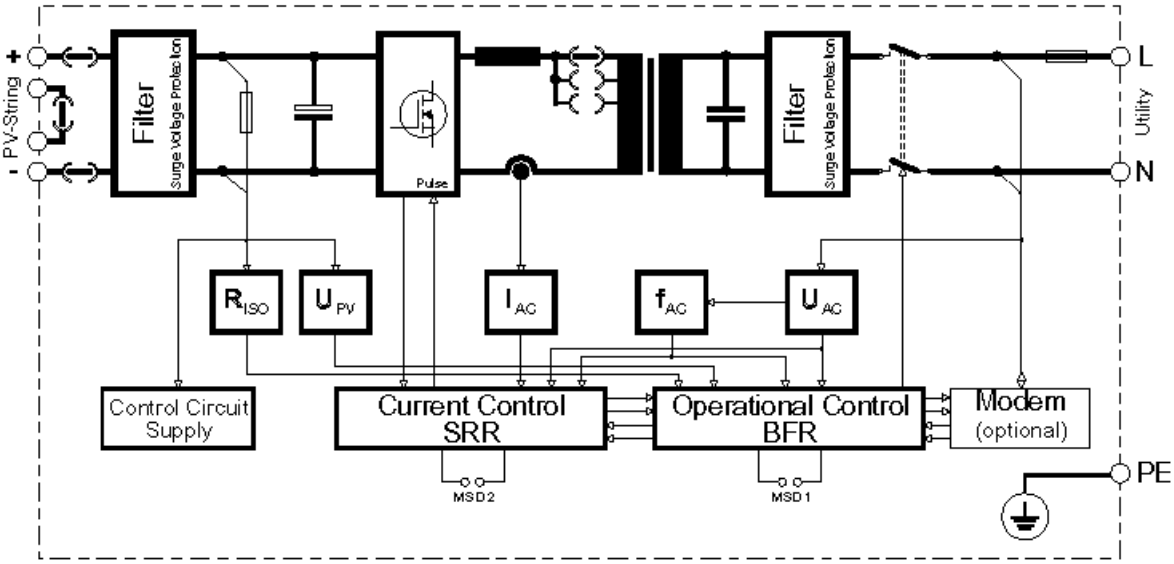
Συγκριτικές μελέτες ωστόσο δείχνουν ότι η εν σειρά σύνδεση των φ/β έχει κι άλλα πλεονεκτήματα, εν αντιθέσει με την παράλληλη. Αυτά έχουν να κάνουν με την ηλεκτρική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Αν για παράδειγμα σε μια συστοιχία υψηλής τάσης, διασύνδεσης φ/β πλαισίων σε σειρά, κάποιο πλαίσιο σκιάζεται και δεν παράγει επαρκή ισχύ, οι δίοδοι παράκαμψης άγουν όποτε δεν επηρεάζεται η ισχύς των υπολοίπων πλαισίων. Αντίθετα σε έναν αντιστροφέα με είσοδο DC χαμηλής τάσης, συνήθως 36 ή 48 volt, απαιτείται η εν σειρά και εν παραλλήλω σύνδεση πολλών συλλεκτών μεταξύ τους. Τρεις ή τέσσερις σε σειρά σύνδεση μεταξύ τους, και όλες οι τετράδες παράλληλα με άλλες τετράδες. Η χαμηλή τάση στην διακλάδωση των συλλεκτών, έχει σα συνέπεια, όταν ένας συλλέκτης παράγει μικρή ισχύ λόγω σκίασης για παράδειγμα, να επηρεάζει και την έξοδο των υπολοίπων που βρίσκονται εν σειρά, μειώνοντας έτσι την απόδοση του συστήματος.



***Εικόνα 3.6* - Δίοδοι παράκαμψης παράλληλα με φωτοβολταϊκά στοιχεία, για την αποφυγή της οριστικής απώλειας ισχύος λόγω μερικής σκίασης.**

3.2.1 Τεχνική περιγραφή

Ο αντιστροφέας Sunny boy 1100, είναι ένας σύγχρονος αντιστροφέας DC/AC που χρησιμοποιεί για την μετατροπή της τάσης τρανζίστορς IGBT. Παρακάτω δίνεται ένα σχεδιάγραμμα της ηλεκτρονικής διάταξης του αντιστροφέα.



Εικόνα 3.7 – **Ηλεκτρικό σχεδιάγραμμα αντιστροφέα φωτοβολταϊκών του μικροδικτύου**

Η συνεχής τάση εισόδου του μετατροπέα, περνώντας πρώτα από ένα φίλτρο για την προστασία από υπερτάσεις καθώς και ένα βαθυπερατό φίλτρο πυκνωτή για την εξομάλυνση του εισερχόμενου ρεύματος και την μείωση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, πηγαίνει σε μια διάταξη μετατροπής της DC τάσης, η οποία και ελέγχεται από κύκλωμα MPPT, ώστε να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος των φωτοβολταϊκών. Η διάταξη αυτή, προσαρμόζει την τάση εξόδου των φωτοβολταϊκών (τάση εισόδου του αντιστροφέα) στην τιμή που εξάγει την μέγιστη ισχύ από αυτά.

Η τάση αυτή, τροφοδοτεί μια γέφυρα που αποτελείται από τέσσερα διπολικά τρανζίστορς ελεγχόμενα από την πύλη (IGBT) τα οποία λειτουργούν με φέρουσα συχνότητα fs=16 KHz. Στην γέφυρα αυτή το ρεύμα μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ημιτονοειδούς μορφής και συχνότητας 50 Hz με την τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM). Το εναλλασσόμενο ρεύμα των 50 Hz οδηγείται στην έξοδο του αντιστροφέα μέσω ενός τοροειδούς μετασχηματιστή απομόνωσης, ο οποίος εξασφαλίζει την ηλεκτρική απομόνωση της DC πλευράς από την AC. Από την έξοδο του μετασχηματιστή πλέον μέσω ενός βαθυπερατού φίλτρου, που είναι απαραίτητο για την εξουδετέρωση ορισμένων υψίσυχνων αρμονικών που παράγονται από τον αντιστροφέα καθώς και για την προστασία από τις υπερτάσεις του δικτύου, η παραγόμενη τάση οδηγείται στο δίκτυο. Όλη η λειτουργία της γέφυρας καθώς και ο χρονισμός σύνδεσης – αποσύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο ελέγχεται πλήρως από ψηφιακά κυκλώματα (MSD1, MSD2).

Συγκεκριμένα τα κυκλώματα ελέγχου MSD1, MSD2 ελέγχουν από την πλευρά της συνεχούς τάσης, την αντίσταση μεταξύ αγωγών ρεύματος και γείωσης καθώς και την τάση των φωτοβολταϊκών. Παράλληλα ελέγχεται και το ρεύμα εισόδου ώστε να μπορεί να διαγνωσθεί η συνθήκη εξόδου μέγιστης ισχύος από τα φωτοβολταϊκά. Από την πλευρά του δικτύου ελέγχονται η συχνότητα, η τάση, η αντίσταση και οι ρυθμοί μεταβολής συχνότητας και αντίστασης.

Ο αντιστροφέας επιτρέπει μονόδρομη ροή ισχύος, δηλαδή μόνο από την είσοδο (πλευρά φ/β συστοιχίας) προς την έξοδο (δίκτυο), με τιμή αναφοράς για τον συντελεστή ισχύος μονάδα ίσο με τη μονάδα (η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος εξόδου, ελέγχεται ώστε να είναι συνεχώς σε φάση με την τάση).

3.2.2 Προστασίες του αντιστροφέα

Ο αντιστροφέας διαθέτει προστασίες για την αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας, από υπερτάσεις και σφάλματα γης τόσο στην dc πλευρά εισόδου όσο και στην ac πλευρά εξόδου.

Την προστασία από τυχόν ατμοσφαιρικές υπερτάσεις που προκαλούνται π.χ. από ηλεκτρικά πεδία οφειλόμενα σε πτώση κεραυνών, αναλαμβάνουν τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο θερμικά ελεγχόμενα varistors. Αυτά είναι varistors τα οποία είναι συνδεμένα σε σειρά με ασφάλεια την οποία ανοίγουν όταν ζεσταθούν απότομα. Έτσι προστατεύεται ο εσωτερικός ηλεκτρονικός εξοπλισμός του αντιστροφέα.

Τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του αντιστροφέα υπάρχουν εσωτερικά αυτόματοι διακόπτες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να συνδέουν τον αντιστροφέα με την dc και την ac πλευρά αντίστοιχα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για την πλευρά της εναλλασσόμενης τάσης, γίνεται έλεγχος για πολλές παραμέτρους από το ηλεκτρονικό κύκλωμα του αντιστροφέα. Αυτό διότι η δυσμενέστερη περίπτωση για τους grid-tied αντιστροφείς είναι η απομονωμένη λειτουργία τους από το δίκτυο (islanding condition), δηλαδή όταν έχει διακοπεί η σύνδεση με το προϋπάρχον δίκτυο αλλά αυτοί εξακολουθούν να τροφοδοτούν τις συσκευές. Αυτή η περίπτωση πέρα από τις αστάθειες στην τάση και τη συχνότητα που μπορεί να επιφέρει, καταστρέφοντας έτσι ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές, μπορεί να αποβεί μοιραία για τον συντηρητή του δικτύου, ο οποίος γνωρίζει μεν ότι κόπηκε το κεντρικό δίκτυο, αλλά όχι ότι υπάρχει ακόμη τάση. Πρόκειται δηλαδή για μια ανάστροφη τροφοδότηση του δικτύου. Η περίπτωση αυτή είναι τελείως ανεπιθύμητη. Έτσι στις κάτωθι περιπτώσεις ο αντιστροφέας αποσυνδέεται από το δίκτυο:

- Δεν συνδέεται καθόλου αν η σύνθετη αντίσταση που βλέπει στην πλευρά του δικτύου είναι μεγαλύτερη από κάποια τιμή Z. (προκαθορισμένη 1,25 Ohm)
- Αποσυνδέεται σε 5 δευτερόλεπτα από τη στιγμή που διαπιστώνει αντίσταση Z του δικτύου μεγαλύτερη από κάποιο όριο (προκαθορισμένη τιμή 1,2Ω).
- Αποσυνδέεται σε 5 δευτερόλεπτα από τη στιγμή που διαπιστώνει μεταβολή στην αντίσταση Z του δικτύου, δηλ. όταν η τιμή ΔZ υπερβεί κάποιο όριο. (ρυθμίζεται)
- Η τάση του δικτύου αποκλίνει από την ονομαστική πέρα από τα όρια που έχουν καθοριστεί. (αποσύνδεση σε 0,2 δευτερόλεπτα)
- Η συχνότητα του δικτύου αποκλίνει από την ονομαστική πέρα από τα όρια που έχουν καθοριστεί. (αποσύνδεση σε 0,2 δευτερόλεπτα).
- Αποσυνδέεται σε 5 δευτερόλεπτα όταν αρχίζει να βλέπει μεταβολή της συχνότητας μεγαλύτερη από ένα όριο, δηλ. $\Delta f > \Delta f_{max}$ (ρυθμίζεται)

Ενώ υπάρχει πλήρης έλεγχος από την πλευρά της εναλλασσόμενης τάσης, δεν υπάρχει αντίστοιχη προστασία από την πλευρά της συνεχούς τάσης. Γι' αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την εγκατάσταση του αντιστροφέα, η δε μέγιστη ισχύς που είναι δυνατόν να παράγουν τα φωτοβολταϊκά που θα συνδεθούν σ' αυτόν, να μην ξεπερνά τα 1400 watt.

Επίσης υπάρχει προστασία από τυχόν διαρροές ρεύματος στην πλευρά συνεχούς τάσης και ο αντιστροφέας σταματά να τροφοδοτεί το δίκτυο αν διαπιστώσει αντίσταση μικρότερη από 1 MOhm μεταξύ θετικού (ή αρνητικού) άκρου της εισόδου και γείωσης.

Εξάλλου για την αποφυγή τοποθέτησης λάθους πολικότητας των άκρων της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, υπάρχει δίοδος στον αντιστροφέα που δεν επιτρέπει την αντίστροφη ροή ρεύματος από την κανονική, πράγμα που θα ήταν επιβλαβές για τη συσκευή (τα φωτοβολταϊκά έχουν έτσι κι αλλιώς ενσωματωμένη δίοδο).

Μια άλλη μορφή προστασίας έχει να κάνει με την λειτουργία του αντιστροφέα και ιδιαίτερα με τη θερμότητα που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του. Η μεγάλη τάση λειτουργίας καθώς και η υψηλή διακοπτική συχνότητα των IGBT' s, συμβάλλουν στην ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιών στο εσωτερικό του αντιστροφέα. Η ψύκτρα των θυρίστορς έχει άνοιγμα προς το πάνω μέρος του αντιστροφέα ώστε να απάγεται η θερμότητα. Ωστόσο η θερμότητα αυτή φτάνει τους 80 ^{o}C και μπορεί να αυξηθεί περισσότερο όταν ο αντιστροφέας λειτουργεί με πλήρες φορτίο και ιδιαίτερα αν επικρατούν και εξωτερικά μεγάλες θερμοκρασίες. Γι' αυτό το λόγο το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα, χρησιμοποιεί ειδικό αλγόριθμο μείωσης της ισχύος που παράγει προκειμένου να μειωθεί η θερμοκρασία. Ο αλγόριθμος αυτός λειτουργεί ως εξής:
Μέχρι τους 65 ^{o}C ο αντιστροφέας λειτουργεί με τη μέγιστή του απόδοση.

Μετά τους 65 ^{o}C, ο αντιστροφέας αρχίζει να μειώνει την ισχύ εξόδου του, κατά συγκεκριμένο ποσό, για κάθε βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας στην ψήκτρα. Για ένα μεγαλύτερο μοντέλο αντιστροφέα της SMA το sunny boy 2500, η μείωση είναι 133 watts κάθε βαθμό Κελσίου, μετά τους 65 ^{o}C. Έτσι με την μείωση της ισχύος εξόδου του, τα θυρίστορς θερμαίνονται λιγότερο και η θερμοκρασία ελαττώνεται.

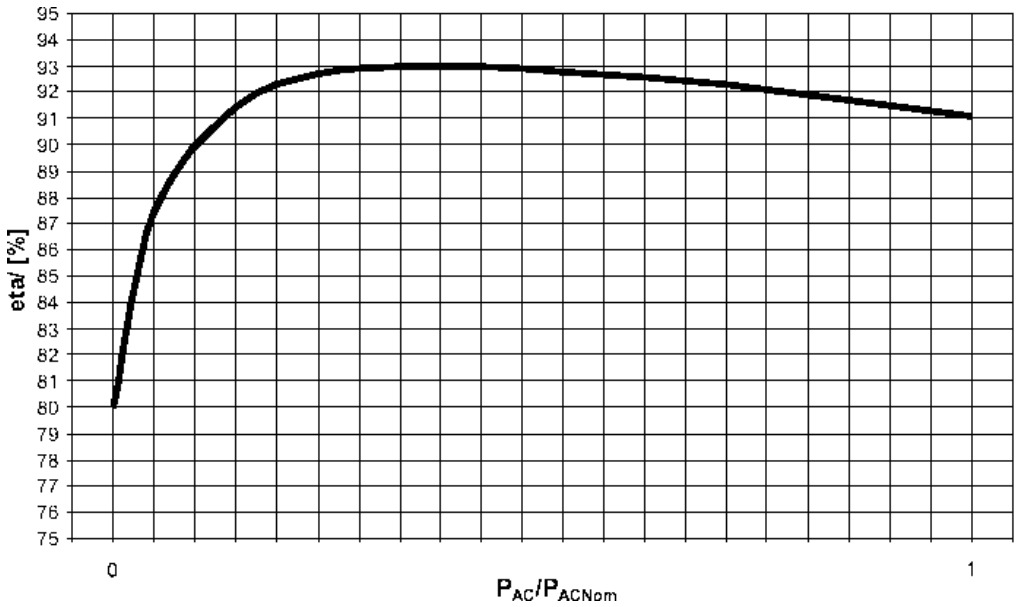
Παρόμοιο έλεγχο της ισχύος εξόδου του είναι δυνατόν να υλοποιήσει και σύμφωνα με τη συχνότητα του δικτύου. Ερμηνεύοντας την αύξηση της συχνότητας στο δίκτυο ως ένδειξη πλεονάζουσας ενεργού ισχύος, ο αντιστροφέας μειώνει την ισχύ εξόδου. Ο έλεγχος αυτός αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε απομονωμένα δίκτυα όπου και η συχνότητα ελέγχεται από αντιστροφέα ισχύος ή μια σύγχρονη γεννήτρια. Έτσι επιτυγχάνεται η συνεργασία των μονάδων αυτών στη βάση της αρνητικής κλίσης ενεργού ισχύος – συχνότητας.

3.2.3 Απόδοση του αντιστροφέα

Η απόδοση ενός αντιστροφέα δεν επηρεάζεται μόνο από τη θερμοκρασία λειτουργίας αλλά και από το ποσοστό φόρτισης αυτού. Έχοντας ως δεδομένο ότι ο αντιστροφέας λειτουργεί κατά τη διάρκεια της ημέρας με διαφορετικό ποσοστό φόρτισης, διαγράφοντας μια καμπύλη που ξεκινά από το μηδέν, φτάνει σε ένα μέγιστο και μηδενίζεται πάλι το βράδυ, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και το στατιστικό στοιχείο της ηλιοφάνειας. Για την πιο αξιόπιστη μέτρηση λοιπόν της απόδοσης είναι αναγκαίο να καθοριστεί το στατιστικό στοιχείο του χρόνου, το οποίο και καθορίζει το ποσοστό του χρόνου στο οποίο θα λειτουργεί με τη συγκεκριμένη κάθε φορά φόρτιση. Έχοντας ως αναφορά την καμπύλη της ηλιοφάνειας που συναντάται στην κεντρική Ευρώπη, έχει καθοριστεί η λεγόμενη κανονικοποιημένη απόδοση $\boldsymbol{\eta_{euro}}$, η οποία λαμβάνει υπ' όψιν το στατιστικό βάρος της φόρτισης σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

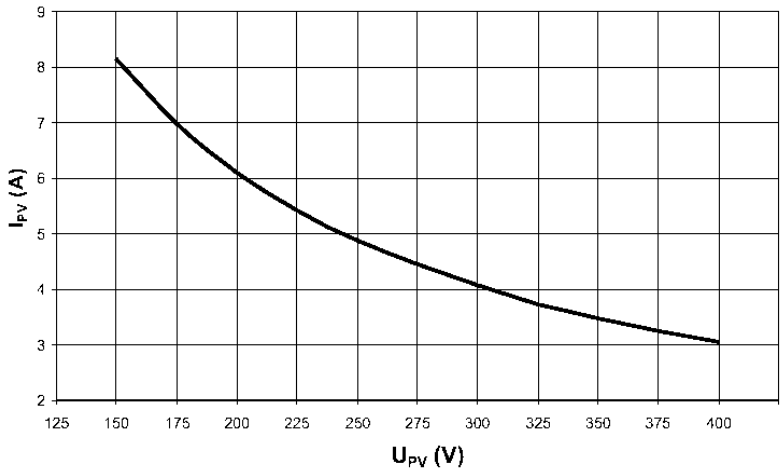
$$\eta_{euro} = 0{,}03 \cdot \eta_{5\%} + 0{,}06 \cdot \eta_{10\%} + 0{,}13 \cdot \eta_{20\%} + 0{,}1 \cdot \eta_{30\%} + 0{,}48 \cdot \eta_{50\%} + 0{,}2 \cdot \eta_{100\%}$$

Η απόδοση του αντιστροφέα στις προδιαγραφές δηλώνεται ότι είναι μεγαλύτερη από 93%. Η κανονικοποιημένη απόδοση είναι μεγαλύτερη ή ίση από 91,3%. Αυτό μένει να επιβεβαιωθεί και στο κεφάλαιο των πειραματικών μετρήσεων. Η απόδοση του αντιστροφέα για κάθε ισχύ εξόδου του ως ποσοστό της ονομαστικής του τιμής φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 3.8 –**Απόδοση %, συναρτήσει της ισχύος εξόδου του αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών**

Το ρεύμα εισόδου μεταβάλλεται συναρτήσει της τάσης εισόδου σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 3.9 – **Ρεύμα εισόδου από τα φωτοβολταϊκά στον αντιστροφέα, συναρτήσει της τάσεως εισόδου. Η τάση εισόδου καθορίζεται κάθε φορά από το κύκλωμα MPPT, αν ο αντιστροφέας λειτουργεί με μεταβλητή τάση εισόδου.**

3.3 Sunny boy control

Ο αντιστροφέας Sunny boy 1100 δεν προσφέρει από μόνος του κάποια ενδεικτική οθόνη για την καταγραφή της λειτουργίας του. Μόνο ενδεικτικές λυχνίες για τυχόν λάθη στην λειτουργία του, αν βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής, αν υπάρχει σφάλμα διαρροής, ή αν υπάρχει εσωτερικό σφάλμα στον αντιστροφέα.

Η καταγραφή της λειτουργίας του αντιστροφέα γίνεται από ξεχωριστή συσκευή ελέγχου, το Sunny boy Control. Το Sunny boy control είναι ξεχωριστή συσκευή η οποία είναι συνδεδεμένη μόνιμα με τον αντιστροφέα και χρησιμοποιείται τόσο για την επιθυμητή ρύθμιση της λειτουργίας όσο και για την καταγραφή διαφόρων μεγεθών όπως παραγόμενη τάση, ένταση, ισχύς, ημερήσια ισχύς.
Το Sunny boy control μπορεί να συνδεθεί και να ελέγξει από 1 έως 50 αντιστροφείς sunny boy, σε ένα ενιαίο δίκτυο λειτουργίας με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

- Μέσω του δικτύου χαμηλής τάσης. Σ' αυτή την περίπτωση δεν απαιτείται κάποιο καλώδιο σύνδεσης του αντιστροφέα με το sunny boy control, καθώς έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν μέσω του δικτύου χαμηλής τάσης, στο οποίο είναι συνδεδεμένες και οι δύο συσκευές. Η επικοινωνία γίνεται με διαμόρφωση ασθενούς σήματος FSK (frequency shift keying) υψηλής συχνότητας το οποίο μεταβιβάζεται στην ημιτονική μορφή της τάσης του δικτύου. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η απόσταση μεταξύ των δύο συσκευών να μην είναι μεγάλη, καθώς τα καλώδια του δικτύου χαμηλής τάσης, δεν ενδείκνυνται για μεταφορά υψίσυχνων σημάτων.
- Μέσω καλωδίου RS-232 9 ακροδεκτών. Με το συνήθη αυτό τύπο καλωδίου υπολογιστή μπορούν να συνδεθούν απ' ευθείας και αξιόπιστα οι δύο συσκευές. Το καλώδιο δεν πρέπει να υπερβαίνει σε μήκος τα 1200 μέτρα για την αποφυγή σφαλμάτων στη μεταφορά δεδομένων.
- Μέσω καλωδίου RS-485. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να συνδεθεί μετατροπέας RS232-RS485 στην είσοδο του sunny boy control.
- Σύνδεση του sunny boy control με υπολογιστή. Όποια μέθοδος κι αν εφαρμόζεται για να επικοινωνεί το control με τον αντιστροφέα, υπάρχει η δυνατότητα μέσω καλωδίου RS232 να συνδεθεί και με ηλεκτρονικό υπολογιστή για την αποθήκευση και την καλύτερη προβολή των καταγεγραμμένων στοιχείων. Στην περίπτωση του μικροδικτύου έχει πραγματοποιηθεί η εξής συνδεσμολογία:

Σύνδεση του sunny boy μέσω καλωδίου RS232 με το sunny boy control. Σύνδεση του sunny boy control με τον αντιστροφέα sunny island μέσω καλωδίου RS485. Σύνδεση του sunny island με υπολογιστή (server) μέσω καλωδίου RS232. Σύνδεση οποιουδήποτε υπολογιστή του εργαστηρίου με τον server του μικροδικτύου μέσω του τοπικού δικτύου. Αρχικά είχε εγκατασταθεί το πρόγραμμα sunny data control της εταιρείας SMA σε υπολογιστή για την καταγραφή των μετρήσεων και τον έλεγχο της λειτουργίας.

Μετά την αναβάθμιση του firmware των αντιστροφέων sunny boy και sunny island, εγκαταστάθηκε σε άλλον υπολογιστή λειτουργικό σύστημα linux. Με αυτόν τον υπολογιστή είναι συνδεδεμένο το sunny island μέσω καλωδίου RS232. Εμπορικά λογισμικά όπως το labview, αλλά και ειδικό λογισμικό που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο, επιτρέπει την ρύθμιση των στοιχείων λειτουργίας των δύο αντιστροφέων καθώς και την προβολή των μετρήσεων που καταγράφουν.

Πέρα από τη σύνδεση του sunny boy control με τον αντιστροφέα υπάρχουν επιπρόσθετα και οι παρακάτω δυνατότητες ελέγχου του αντιστροφέα:

- Απευθείας καλωδιακή σύνδεση του αντιστροφέα με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Σε περίπτωση που υπάρχει στην εγκατάσταση μόνο ένας αντιστροφέας sunny boy, αυτός μπορεί να συνδεθεί κατ' ευθείαν με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για να γίνεται ο έλεγχος λειτουργίας του, μέσω καλωδίου RS232. Το καλώδιο δεν πρέπει να ξεπερνά σε αυτή την περίπτωση τα 15 μέτρα.
- Σε περίπτωση πολλών αντιστροφέων, ένα μόντεμ τύπου SWR-COM μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο χαμηλής τάσης καθώς και σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο έλεγχος όλων των αντιστροφέων μπορεί να γίνει μέσω του υπολογιστή.

3.4 SUNNY ISLAND. Αμφίδρομος αντιστροφέας συσσωρευτών

Η πιο σύνθετη συσκευή του μικροδικτύου, είναι ο αντιστροφέας ισχύος Sunny island 3300. Ο συγκεκριμένος αντιστροφέας χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των συσσωρευτών μολύβδου – οξέος με το δίκτυο χαμηλής τάσης. Η διάταξη προορίζεται βασικά για χρήση σε αυτόνομα μικρά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας που δεν είναι διασυνδεδεμένα με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Ακόμη όμως και αν το μικροδίκτυο είναι διασυνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο χαμηλής τάσης, ο αντιστροφέας sunny island μπορεί να λειτουργήσει σαν μονάδα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS), εντοπίζοντας μια τυχόν διακοπή της τάσης του κεντρικού δικτύου, και τροφοδοτώντας τότε αμέσως τα φορτία του μικροδικτύου.

Α) Αυτόνομα δίκτυα.

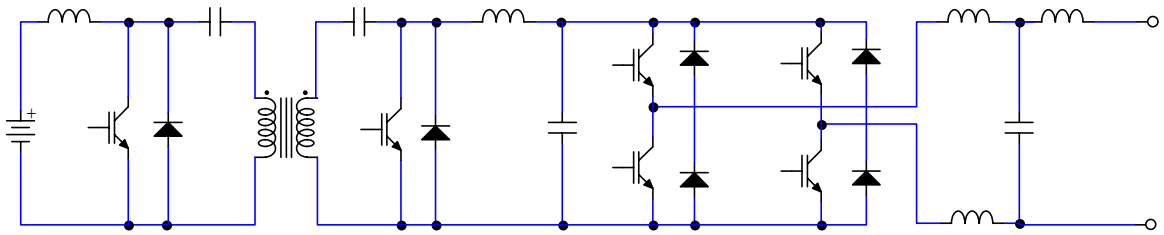
Σε αυτόνομα μικροδίκτυα χαμηλής τάσης, μονοφασικής εάν πρόκειται για ένα μόνο sunny island, ή τριφασικής εάν πρόκειται για τρία, βασικός σκοπός του αντιστροφέα είναι να ρυθμίζει την τάση και τη συχνότητα του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται με το να συμπληρώνει τη λειτουργία των ηλιακών συλλεκτών, δηλαδή την ισχύ που παρέχουν οι αντιστροφείς sunny boy στο δίκτυο. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, οπότε τα φωτοβολταϊκά παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο, σε περίπτωση που η παρεχόμενη ενέργεια είναι περισσότερη από την καταναλισκόμενη φορτίζουν τους συσσωρευτές, αντίθετα όταν η παρεχόμενη ενέργεια είναι λιγότερη από αυτή που ζητείται τότε παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, ο αντιστροφέας sunny island παρέχει ισχύ στο δίκτυο. Να σημειωθεί ότι βασική λειτουργία του αντιστροφέα είναι όχι μόνο να κρατάει σταθερές την τάση και τη συχνότητα του αυτόνομου δικτύου με το να ελέγχει την φόρτιση – εκφόρτιση των συσσωρευτών σύμφωνα με το ενεργειακό ισοζύγιο του μικροδικτύου, αλλά και να ελέγχει άλλες συσκευές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως γεννήτριες ντίζελ και ανεμογεννήτριες σε περίπτωση που η αποθηκευμένη ενέργεια των συσσωρευτών δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση. Αντίθετα όταν οι συσσωρευτές είναι πλήρως φορτισμένοι και η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά είναι μεγαλύτερη από αυτή που καταναλίσκεται ο αντιστροφέας μπορεί να θέσει σε λειτουργία ένα φορτίο για να απορροφήσει την υπερπαραγωγή (π.χ. ηλεκτρικές αντιστάσεις, αντλίες), είτε να διακόψει τη λειτουργία των φ/β συλλεκτών.

Β) Δίκτυα διασυνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο.

Σε αυτή την περίπτωση η λειτουργία του sunny island δεν είναι τόσο καθοριστικής σημασίας. Ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργεί ως συσκευή αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS), παρέχοντας ισχύ στο δίκτυο του κτιρίου που είναι εγκατεστημένο, όταν το δίκτυο αυτό αποκοπεί από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, είτε συμβεί ημέρα όπου τα φωτοβολταϊκά παράγουν ενέργεια είτε νύχτα που δεν παράγουν, ο αντιστροφέας sunny island μπορεί να τροφοδοτήσει αυτόματα ένα περιορισμένο δίκτυο το οποίο βέβαια θα έχει απομονωθεί από το κεντρικό, με χρόνο μεταγωγής της τάξεως των millisecond.

3.4.1 Τεχνική περιγραφή

Ο sunny island 3300 είναι ένας αντιστροφέας πηγής τάσης τεσσάρων τεταρτημορίων και ονομαστικής ισχύος 3300 VA. Συγκεκριμένα πρόκειται για μια διάταξη μετατροπέα DC/DC με μετασχηματιστή απομόνωσης υψηλής συχνότητας, και αντιστροφέα διακοπτικού τύπου DC/AC που χρησιμοποιεί πλήρη γέφυρα τρανζίστορς IGBT. Παρακάτω δίνεται ένα απλοποιημένο σχεδιάγραμμα του αντιστροφέα.



Εικόνα 3.10 **- Κυκλωματικό σχεδιάγραμμα του αντιστροφέα sunny island. Περιλαμβάνει φίλτρα πυκνωτών και πηνίων, αμφίδρομο μετατροπέα CUK (DC-DC) με ενδιάμεσο μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας και πλήρη γέφυρα τεσσάρων IGBT και διόδων ισχύος DC-AC αμφίδρομης ροής ισχύος. Τελευταίο το πηνίο σύνδεσης (coupling inductor).**

Τάση εισόδου του αντιστροφέα είναι η συνεχής τάση των συσσωρευτών τους οποίους και ελέγχει. Η συνεχής αυτή τάση μέσω πηνίου, εισέρχεται στον αμφίδρομο μετατροπέα CUK (DC/DC) που περιλαμβάνει μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας. Ο μετατροπέας αυτός στην βασική του μορφή επιτρέπει ροή της ισχύος μόνο κατά μια κατεύθυνση, ωστόσο στη συγκεκριμένη διάταξη πρόκειται για μια τροποποιημένη του μορφή ώστε να επιτρέπει ροή ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις. Ο μετατροπέας περιλαμβάνει στο ενδιάμεσο του στάδιο και μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας, ώστε να εξασφαλίζεται η γαλβανική απομόνωση της εισόδου από την έξοδο. Η συχνότητα των παλμών της τάσης στον μετασχηματιστή είναι 16,6KHz. Ο μετατροπέας CUK ελέγχεται από ένα κεντρικό ελεγκτή του αντιστροφέα (ελεγκτή που χρησιμοποιεί υπερτιθέμενο PI ελεγκτή) ελέγχει την τάση του ενδιάμεσου κυκλώματος. Ο ελεγκτής αυτός λειτουργεί με τη μισή συχνότητα από αυτήν των παλμών της τάσης (8,3KHz).

Η χρήση αμφίδρομου μετατροπέα DC/DC είναι απαραίτητη ώστε η ισχύς να ρέει και προς τις δύο κατευθύνσεις, είτε για την φόρτιση των συσσωρευτών είτε για την εκφόρτιση.

Η έξοδος του αντιστροφέα διακοπτικού τύπου DC/DC είναι μια ελεγχόμενη τάση 380V. Η συνεχής αυτή τάση, πάλι μέσω φίλτρων επαγωγέων και πυκνωτών εισέρχεται σε μια πλήρη γέφυρα των IGBT's όπου με τη μέθοδο της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη 230V/50Hz.

Και εδώ η χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, επιτρέπει τη λειτουργία του και στα τέσσερα τεταρτημόρια του διαγράμματος τάσης – έντασης. Έτσι ο αντιστροφέας μπορεί να απορροφά ενεργό ισχύ απ' το δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης ώστε να φορτίζει τους συσσωρευτές αλλά και να απορροφά ισχύ από τους συσσωρευτές για να την παρέχει στο φορτίο ή το δίκτυο. Ομοίως μπορεί να ανταλλάσσει την απαιτούμενη άεργο ισχύ με τα φορτία ή το δίκτυο.

Η *φέρουσα συχνότητα* με την οποία λειτουργούν ανά δύο τα ζεύγη των διακοπτών της γέφυρας είναι f_s=16,6KHz. Οπότε ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας, για *συχνότητα διαμόρφωσης* f_1, τη συχνότητα του δικτύου (50Hz), προκύπτει:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} = \frac{16600}{50} = 332$$

Ο έλεγχος της τάσης εξόδου γίνεται με τον σειριακά από τα δύο κυκλώματα ελέγχου του DC/DC converter και του DC/AC inverter. Η συχνότητα των 8,3KHz με την οποία δουλεύει ο κεντρικός ελεγκτής επιτρέπει 120μsec χρόνου για υπολογισμούς ανά παλμό ρολογιού. Τα 60μsec διατίθενται για τον έλεγχο του CUK μετατροπέα ενώ τα άλλα 60μsec για τον έλεγχο του αντιστροφέα. Στο διάστημα των 120μsec παίρνονται όλες οι μετρήσεις που απαιτούνται για τον υπολογισμό της τάσης εξόδου, της ισχύος και της συχνότητας, και ανάλογα τροφοδοτείται η γέφυρα PWM του αντιστροφέα.

Μετά την αναβάθμιση του αντιστροφέα για λειτουργία με κλίσεις στατισμού, το σήμα Vcontrol, προέρχεται από τον υπολογισμό της αέργου ισχύος εξόδου του αντιστροφέα. Η ταυτόχρονη και ακριβής μέτρηση της ενεργού και αέργου εξόδου γίνεται μέσω του διανύσματος της μιγαδικής ισχύος S, σύμφωνα με το παρακάτω λειτουργικό διάγραμμα.

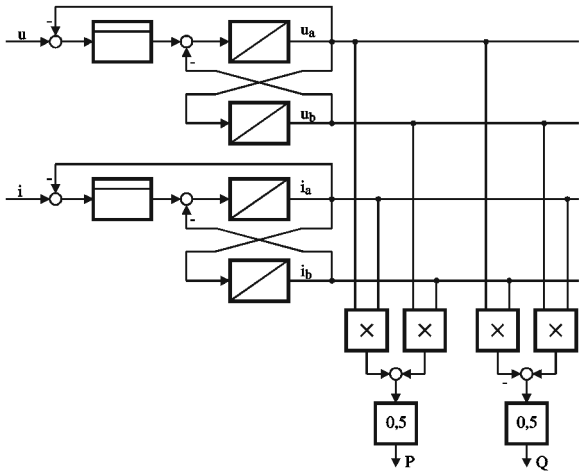


Fig. 5. Fast single-phase P/Q-computation

Εικόνα 3.11 – Λειτουργικό σχεδιάγραμμα που χρησιμοποιεί ο αντιστροφέας για τον ταχύ υπολογισμό της ενεργού και αέργου ισχύος εξόδου του, με βάση το ρεύμα και την τάση.

Για το διάνυσμα της μιγαδικής ισχύος έχουμε:

$$S = P + jQ = \frac{1}{2} \cdot \vec{u} \cdot \overset{*}{i} = \frac{1}{2} \cdot \left(u_a + ju_b\right) \cdot \left(i_a - ji_b\right)$$

οπότε διαχωρίζοντας πραγματικό και φανταστικό μέρος, παίρνουμε για τα προς μέτρηση μεγέθη P και Q:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \left(u_a \cdot i_a + u_b \cdot i_b\right)$$

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \left(u_b \cdot i_a - u_a \cdot i_b\right)$$

Μετρώντας κάθε στιγμή λοιπόν τις τιμές του ρεύματος και της τάσης εξόδου, ο αντιστροφέας καθορίζει τους λόγους m_f και m_a, για την παραγωγή της επιθυμητής τάσης και συχνότητας.

Η ημιτονοειδής τάση της γέφυρας μέσω φίλτρου οδηγείται στην έξοδο του αντιστροφέα για να συνδεθεί με το δίκτυο χαμηλής τάσης. Το στάδιο εξόδου περιλαμβάνει επαγωγή συνδέσεως (coupling inductor) τιμής 0.8mH και φίλτρο πυκνωτή.

Στην είσοδο του αντιστροφέα υπάρχει διπολικός αυτόματος διακόπτης συνεχούς ρεύματος (63A) και στην έξοδό του διπολικός αυτόματος διακόπτης 16A. Παρακάτω δίνονται τα περισσότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του sunny island.

Μέγιστη ισχύς εξόδου	4,3 KVA (για χρόνο μέχρι 30 λεπτά, σε θερμοκρασία 20 ^{o}C)
Ονομαστική ισχύς εξόδου	3,3 KVA
Απόδοση	>= 90%
Ονομαστική τάση συστοιχίας συσσωρευτών	60 Volt
Τάση λειτουργίας συστοιχίας συσσωρευτών	46 – 81 Volt
Ονομαστικό ρεύμα συσσωρευτών	60 A

Μέγιστο ρεύμα συσσωρευτών	125 A
Ονομαστική τάση εξόδου	230 Volt
Εύρος τάσης εξόδου	196 – 253 Volt
Ονομαστικό ρεύμα εξόδου	14,5 A
Ονομαστική συχνότητα εξόδου	50 Hz
Εύρος συχνότητας εξόδου	48 – 62 Hz
Αρμονική παραμόρφωση εξόδου (μετρημένη με αρμονική παραμόρφωση δικτύου <2% και απόδοση του αντιστροφέα P>0,5 Pac nom	<3%
Προστασία από υπερφόρτωση	Με αυτόματους διακόπτες
Κυμάτωση τάσης	< 5%
Προστασία από ανάστροφη πολικότητα	Όχι

Πίνακας 3.3 **– Τεχνικά χαρακτηριστικά αντιστροφέα συσσωρευτών του μικροδικτύου sunny island**

3.4.2 Επιμέρους στοιχεία του Sunny Island

Η πιο πάνω τοπολογία ανταποκρίνεται επαρκώς στις αυξημένες ικανότητες του sunny island να ελέγχει όχι μόνο το ρεύμα και την τάση εισόδου (συσσωρευτές) και το αντίστοιχο ρεύμα και τάση του δικτύου, αλλά και πολλές άλλες συσκευές που μπορεί να λειτουργούν παράλληλα και να απορροφούν ή να παράγουν ενέργεια στο δίκτυο.

Ο έλεγχος αυτός γίνεται με τη χρήση 8 ρελέ τα οποία υπάρχουν στη συσκευή, καθώς και ειδικών υποδοχών για καλώδια μετρήσεων και αισθητήρων.

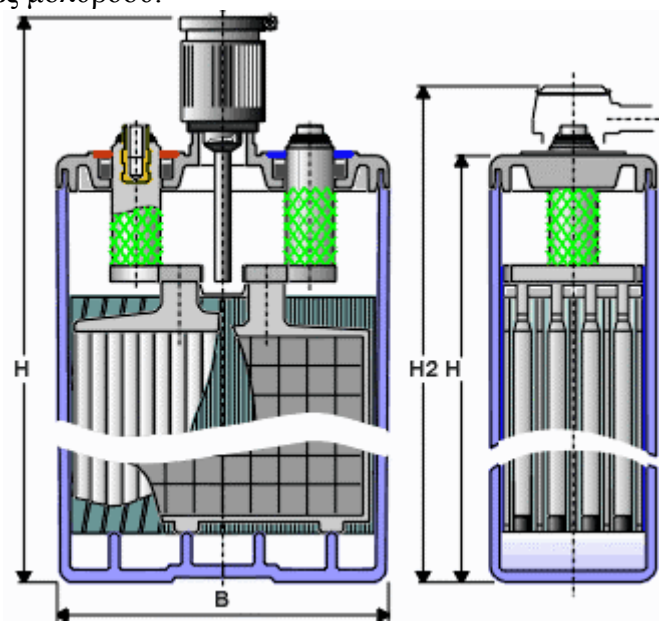
- Ακροδέκτες για μέτρηση συγχρονισμού, τάσης και έντασης εξωτερικής γεννήτριας. Σε περίπτωση ύπαρξης στο δίκτυο εξωτερικής γεννήτριας που λειτουργεί παράλληλα με το sunny island ή και ελέγχεται από αυτό, υπάρχουν υποδοχές για τα καλώδια που μεταφέρουν τα ανωτέρω σήματα. Για την μέτρηση του ρεύματος απαιτείται ειδικός μετατροπέας υποβιβασμού.
- Υποδοχές για τη σύνδεση αισθητήρων θερμοκρασίας των συσσωρευτών. Επειδή κατά τη φόρτιση των συσσωρευτών αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους θερμότητα η οποία δεν πρέπει να ξεπερνά κάποια όρια, συνήθως συνδέονται αισθητήρες στους συσσωρευτές, ώστε η φόρτιση αυτών να επιβραδύνεται αν η θερμοκρασία τους ξεπερνά κάποια τιμή. Το μέγιστο ρεύμα το οποίο μπορούν να χειριστούν τα παρακάτω ρελέ είναι 5 A για τάση 230 volt.
- Ρελέ ελέγχου: - K1: Εκκίνηση γεννήτριας. Το ρελέ αυτό χρησιμοποιείται για να ξεκινήσει η γεννήτρια σύμφωνα με τις ρυθμίσεις που έχουν γίνει.
- K2: το ρελέ αυτό ενεργοποιεί τη σύνδεση της γεννήτριας που εκκίνησε με το προηγούμενο ρελέ, με τον αντιστροφέα
- K3: το ρελέ αυτό ενεργοποιεί τη σύνδεση με ένα εξωτερικό δίκτυο χαμηλής τάσης
- K4: ανεξάρτητο ρελέ ελέγχου
- K5: ανεξάρτητο ρελέ ελέγχου
- K6: ρελέ για την ενεργοποίηση της προθέρμανσης της γεννήτριας
- K7: ρελέ για την παροχή τάσης για τον αερισμό του δωματίου των συσσωρευτών
- K8: ρελέ για την παροχή τάσης σε αντλία – κυκλοφορητή του υγρού των συσσωρευτών.

Να σημειωθεί ότι η παραπάνω διάταξη δεν είναι σταθερή αλλά μπορεί να αλλάξει σύμφωνα με την τοπολογία των συνδέσεων στην οποία θα συνδεθεί ο αντιστροφέας.

3.5 Οι συσσωρευτές του μικροδικτύου

Στο μικροδίκτυο του εργαστηρίου ΣΗΕ είναι εν σειρά εγκατεστημένοι 30 συσσωρευτές Ergon OPzS των 2 volt, και ονομαστικής χωρητικότητας C_{10}=250Ah ή C_{120}=370Ah, δίνοντας συνολικά μια τάση εξόδου 60 volt. Οι τιμές αυτές αναφέρουν την μέγιστη χωρητικότητα του κάθε στοιχείου των 2 Volt, όπως προκύπτει από την εξίσωση Peukert για χρόνο εκφόρτισης 10 και 120 ωρών αντίστοιχα. Στην πρώτη δηλαδή περίπτωση, εννοείται ότι το στοιχείο μπορεί να δίνει 25A για 10 ώρες, ενώ στη δεύτερη ότι το στοιχείο μπορεί να δίνει ρεύμα 3A για 120 ώρες. Προφανές είναι ότι η χωρητικότητα των στοιχείων μειώνεται συναρτήσει του ρεύματος εξόδου. Έτσι η συνολική ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν είναι 60*250=15000 Wh=15KWh για ρεύματα εκφόρτισης 25A, ή 60*370=22,2KWh για ρεύματα εκφόρτισης 3A.

Είναι τεχνολογίας μολύβδου-αντιμονίου και περιέχουν σαν ηλεκτρολύτη διάλυμα θειικού οξέος. Από όσες κατηγορίες συσσωρευτών αναφέρθηκαν είναι οι πιο κατάλληλες για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα, λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής τους και της ικανότητας τους να εκφορτίζονται βαθιά. Οι θετικές πλάκες αποτελούνται από συμπαγείς χοντρές σωλήνες μολύβδου (tubular plates) πάνω σε πλαστικό υλικό ενώ οι αρνητικές από σχάρες μολύβδου.



Εικόνα 3.12 **– Τομή και πλάγια όψη δίβολτου συσσωρευτή σωληνοειδών πλακών (tubular plates)**

Οι προδιαγραφές τους αναφέρουν διάρκεια ζωής 15 έτη, όταν χρησιμοποιούνται σαν εφεδρικοί (stand-by use), δηλαδή χωρίς να εκφορτίζονται/φορτίζονται διαρκώς.

Για κυκλική χρήση, οι προδιαγραφές τους αναφέρουν ότι μπορούν να πραγματοποιήσουν το λιγότερο 1200 κύκλους για ένα βαθμό εκφόρτισης έως και 80% με ρεύμα C/10, δηλαδή 250/10=25 A, για την περίπτωση των συσσωρευτών του εργαστηρίου. Για βαθμούς εκφόρτισης μέχρι και 50% οι κύκλοι μπορούν να φτάσουν και τους 3000. Οι τιμές αυτές βάθους εκφόρτισης και ρεύματος είναι οι μέγιστες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό τον τύπο συσσωρευτών.

Η τιμή του μέγιστου ρεύματος που μπορούν να παρέχουν, αν υπολογιστεί από τον πρακτικό τύπο $\mathrm{Im}ax = \frac{C}{0{,}05h}$ βρίσκεται $\frac{250Ah}{0{,}05h} = 5000A$. Δεδομένου ότι ο αντιστροφέας sunny island μπορεί να εξάγει μέγιστη ισχύ 6,6KW για διάστημα 20 sec., ένα ρεύμα $I = \frac{6600W}{60V} = 110A$, απαιτείται. Συνεπώς οι συσσωρευτές είναι ικανοί να παρέχουν τη μέγιστη ισχύ των 6,6KW.

Ο βαθμός αυτοεκφόρτισης των συγκεκριμένων στοιχείων έχει μετρηθεί ως εξής:

Ξεκινώντας από κατάσταση πλήρους φόρτισης (100%), αν αφεθούν 90 ημέρες ανοιχτοκυκλωμένα (δηλαδή χωρίς να εκφορτιστούν ή να φορτιστούν), χάνουν το 9% της αποθηκευμένης ενέργειάς τους. Ο βαθμός αυτοεκφόρτισης είναι δηλαδή 3% ανά μήνα.

Τάση μέγιστης φόρτισης (Voltage regulation, VR)	2,40-2,44 volts/cell
Τάση συντήρησης (float charge)	2,23 volts/cell
Τάση βελτιστοποίησης φόρτισης (equalizing charge)	2,50 volts/cell
Συνιστώμενη θερμοκρασία λειτουργίας	10 – 30 ^{o}C
Πυκνότητα ηλεκτρολύτη	1,25 gr/cm^3

***Πίνακας 3.4* – Χαρακτηριστικά των συσσωρευτών του μικροδικτύου (2Volt Ergon OpzS)**

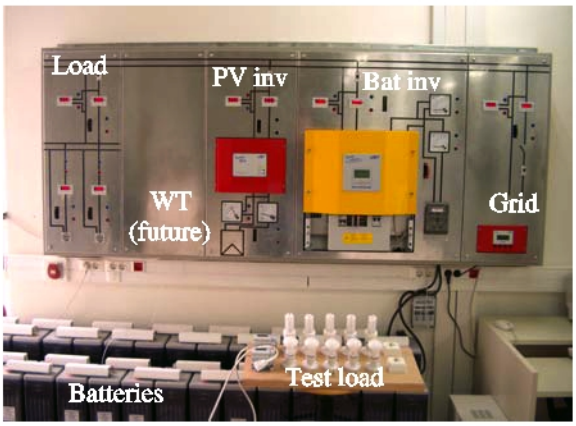
3.6 Άλλες διατάξεις του μικροδικτύου

Σαν φορτία χρησιμοποιούνται κοινοί λαμπτήρες (ωμικά φορτία), σύγχρονοι ηλεκτρονικοί (compact fluorescent bulbs), οι οποίοι παρουσιάζουν και ωμική αλλά και επαγωγική συμπεριφορά, μονοφασικός κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος, πηνία, πυκνωτές και αντιστάσεις του εργαστηρίου ελεγχόμενες από πίνακα μέσω διακοπτών.

Για τη σύνδεση-αποσύνδεση του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο χρησιμοποιείται μικροαυτόματος Hager ES240, ο οποίος και ελέγχεται από τον αντιστροφέα.

Βολτόμετρα και αμπερόμετρα και ασφάλειες υπάρχουν σε κάθε ζυγό (φορτία, αντιστροφέα φωτοβολταϊκών, αντιστροφέα sunny island, δίκτυο).

Όλες οι διατάξεις του μικροδικτύου, εκτός φυσικά από τους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες και τα φορτία, έχουν τοποθετηθεί στον τοίχο του εργαστηρίου, και έχουν καλυφθεί με μεταλλικό πλαίσιο για προστασία και καλύτερη παρουσίαση της ηλεκτρικής σύνδεσης των διατάξεων.



***Εικόνα 3.13* – Το εργαστηριακό μικροδίκτυο**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ

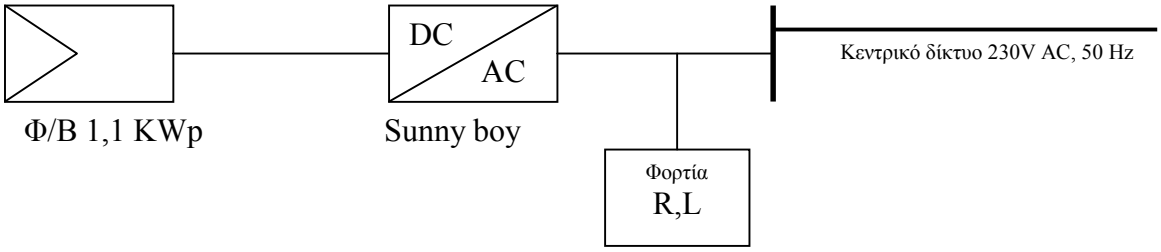
Στο κεφάλαιο αυτό θα επιχειρηθεί η περιγραφή της λειτουργίας του μικροδικτύου καθώς και οι δυνατότητες που παρέχουν οι δύο αντιστροφείς του συστήματος. Θα εξεταστούν οι διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας που μπορούν να υλοποιηθούν από τις επιμέρους συσκευές του μικροδικτύου. Αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- **Λειτουργία διασύνδεσης στο κεντρικό δίκτυο μόνο του αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών sunny boy, χωρίς την λειτουργία του αντιστροφέα συσσωρευτών sunny island. (grid-tied mode)**
- **Αυτόνομη λειτουργία του συστήματος ως μικροδίκτυο, χωρίς διασύνδεση με το δίκτυο ή εφεδρική γεννήτρια (island mode, RUN-U)**
- **Διασυνδεδεμένη λειτουργία και των δύο αντιστροφέων με το δίκτυο ή με γεννήτρια (grid-tied mode, RUN-I ή RUN-U_EXT)**

Αναφέρονται οι δυνατότητες ελέγχου και ρυθμίσεων κάθε συσκευής καθώς καταγράφεται το κάθε μοντέλο λειτουργίας. Οι ρυθμίσεις που αναφέρονται μπορούν να γίνουν είτε απ' ευθείας από τον πίνακα ελέγχου των αντιστροφέων (στο sunny boy control για τον αντιστροφέα sunny boy) και στο sunny island. Ακόμη πιο εύκολα οι ρυθμίσεις που αναφέρονται μπορούν να γίνουν μέσω υπολογιστή με το πρόγραμμα Sunny data control, με το labview, ή το matrikon OPC explorer.

4.1 Λειτουργία ηλιακών συλλεκτών - αντιστροφέα

Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται η περίπτωση λειτουργίας μόνο των φωτοβολταϊκών συλλεκτών και του αντιστροφέα sunny boy. Αγνοείται τελείως η ύπαρξη των συσσωρευτών και του αντιστροφέα τους. Οι συλλέκτες μέσω του αντιστροφέα, παρέχουν την παραγόμενη ισχύ στο δίκτυο. Η περίπτωση αυτή αποτελεί τυπικό παράδειγμα διανεμημένης παραγωγής από φωτοβολταϊκά, σημαντική εφαρμογή της οποίας είναι η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στις στέγες σπιτιών. Τα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο χαμηλής τάσης συστήματα, κερδίζουν συνεχώς έδαφος, και ενισχύονται ποικιλοτρόπως όπως προαναφέρθηκε από τις κυβερνήσεις και τους διεθνείς οργανισμούς.



Σχεδιάγραμμα 4.1 **– Σύνδεση αντιστροφέα φωτοβολταϊκών με το δίκτυο**

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι διατάξεις που δεν χρειάζονται κάποιον χειρισμό για την λειτουργία τους. Αναπτύσσουν διαφορά δυναμικού στα άκρα τους με το φως της ημέρας και σταματάνε όταν πέσει το φως. Για να μην υπάρχει αντίστροφη ροή ρεύματος από το δίκτυο προς τους συλλέκτες, όταν αυτοί δεν παράγουν ρεύμα, έχουν ενσωματωμένες διόδους οι οποίες και επιτρέπουν ροή ρεύματος μόνο κατά τη φορά που παράγεται από τα στοιχεία.

Ο μόνιμα συνδεδεμένος σε δίκτυο αντιστροφέας sunny boy 1000E, ελέγχει σε τακτά χρονικά διαστήματα την τάση στα άκρα της εισόδου του. Ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει την τάση στην οποία ο αντιστροφέας θα αρχίσει να λειτουργεί. Καθορισμένη τιμή είναι τα 180 volt. Όταν ο αντιστροφέας μετρήσει στην είσοδο του τάση από τα φωτοβολταϊκά μεγαλύτερη από 180 volt, ετοιμάζεται για να συνδεθεί στο δίκτυο. Η τάση αυτή μπορεί να καθοριστεί από τον χρήστη και να λάβει τιμές από 125 έως 250 volt. Η ρύθμιση αυτή γίνεται με το πεδίο ελέγχου **Upv-start**. Καλό θα ήταν ωστόσο να μην ρυθμίζεται πολύ χαμηλά αυτή η τιμή, για να αποφεύγεται η συχνή σύνδεση και επανασύνδεση του αντιστροφέα με το δίκτυο. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί αν μια συννεφιασμένη ημέρα, ενώ θα ξεκίναγε ο αντιστροφέας μετρώντας μια τάση των φωτοβολταϊκών πάνω από 125volt, τυχόν επίδραση των νεφών θα έριχνε την τάση με συνέπεια να διακόπτεται η τροφοδότηση. Η περίπτωση αυτή θα ήταν πιο εύκολο να συμβεί αν η ισχύς των φωτοβολταϊκών είναι μικρότερη από τη συνιστώμενη των 1400 Wp.

Αφού εξασφαλιστεί επαρκής τάση για την τροφοδότηση του δικτύου, ο αντιστροφέας ελέγχει τις παραμέτρους του δικτύου στο οποίο είναι συνδεδεμένο.
Για την τροφοδότηση του δικτύου από τον αντιστροφέα, πρέπει να πληρούνται οι κάτωθι προϋποθέσεις:

- Τάση δικτύου 230 volt με όρια ανοχής –15% έως +10% (195,5 – 253 volt, υπάρχει δυνατότητα αλλαγής των ορίων)
- Συχνότητα δικτύου: 50 Hz με όρια ανοχής –0,2 έως +0,2 Hz (υπάρχει δυνατότητα αλλαγής)
- Σύνθετη αντίσταση δικτύου: μικρότερη από 1,25 Ω (απενεργοποιημένη ρύθμιση στο εργαστηριακό μικροδίκτυο)

Οι απαιτήσεις αυτές είναι αναγκαίες για την ασφαλή σύνδεση του δικτύου. Αφού συνδεθεί στο δίκτυο και αρχίσει να παρέχει ισχύ, τα μεγέθη αυτά μετρούνται συνεχώς. Ωστόσο για την αποφυγή τυχόν απομονωμένης λειτουργίας (islanding), ο αντιστροφέας ελέγχει όχι μόνο τις τιμές αυτών των μεγεθών αλλά και το ρυθμό μεταβολής τους.

Έτσι ο αντιστροφέας αποσυνδέεται από το δίκτυο εάν - πέρα από την περίπτωση που παραβιαστούν τα προαναφερθέντα όρια- μετρηθούν τα ακόλουθα:

- Εάν διαπιστωθεί ταχεία μεταβολή της συχνότητας για διάστημα 5 δευτερολέπτων (δυνατότητα ρύθμισης του ρυθμού μεταβολής).
- Εάν διαπιστωθεί ρυθμός αύξησης της αντίστασης του δικτύου μεγαλύτερος από 0,5 Ω για πολύ μικρό διάστημα (δυνατότητα ρύθμισης του ρυθμού).
- Εάν διαπιστωθεί αύξηση της αντίστασης του δικτύου πάνω από 1,75 Ω (δυνατότητα ρύθμισης του ορίου)

Η μέτρηση στον αντιστροφέα αυτών των τιμών γίνεται με δύο ξεχωριστές συσκευές ελέγχου που διακόπτουν το δίκτυο και είναι συνδεδεμένες σε σειρά ώστε να παρέχεται μεγαλύτερη ασφάλεια (ENS).

4.1.2 Εκτεταμένη ανάλυση των δυνατοτήτων του αντιστροφέα sunny boy.

Από τη στιγμή που ο αντιστροφέας μετρήσει τιμές των παραπάνω μεγεθών στα όρια που αναφέρονται, αρχίζει να τροφοδοτεί το δίκτυο. Το διάστημα στο οποίο θα αρχίσει να τροφοδοτεί το δίκτυο από τη στιγμή που θα διαπιστώσει ότι πληρούνται οι προϋποθέσεις κυμαίνεται από 5 έως 300 δευτερόλεπτα και καθορίζεται από το πεδίο ελέγχου **T-Start**. Προκαθορισμένη τιμή είναι τα 10 δευτερόλεπτα.

Ο αντιστροφέας τροφοδοτεί το δίκτυο με ισχύ συνεχώς αν δεν διαπιστώσει υπέρβαση των παραπάνω τιμών. Η λειτουργία του αντιστροφέα σταματά όταν η τάση εισόδου κατέβει κάτω από μια καθορισμένη τιμή. Προκαθορισμένη τιμή είναι τα 145 volt, ενώ υπάρχει δυνατότητα ρύθμιση αυτής από 121 έως 250 volt. Η ρύθμιση αυτή γίνεται με το πεδίο ελέγχου **Upv-stop.**

Για την αποφυγή ανεπιθύμητης αποσύνδεσης του αντιστροφέα σε περίπτωση μιας τυχαίας βύθισης της τάσης (π.χ. από την εκκίνηση κοντινών κινητήρων, ψυγείων) υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου του χρόνου, μέσα στον οποίο θα διατηρηθεί η τάση του δικτύου σε αυτή τη χαμηλή στάθμη. Συνήθως οι βυθίσεις του δικτύου είναι της τάξεως των msec. Ο χρόνος αυτός μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 1και 300 sec, με εργοστασιακή ρύθμιση τα 2 sec, ενώ η ρύθμιση αυτού γίνεται με το πεδίο **T-Stop.**

Για την απορρόφηση ισχύος από τα φωτοβολταϊκά υπάρχουν δύο δυνατότητες:

-**Τροφοδότηση με σταθερή τάση**. Στην περίπτωση αυτή ο αντιστροφέας ρυθμίζεται να απορροφά ισχύ με καθορισμένη από το χρήστη τάση. Όπως φάνηκε προηγουμένως η τάση ενός φωτοβολταϊκού δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίο που συνδέεται στα άκρα του, άρα το ρεύμα εξόδου. Ο αντιστροφέας μπορεί να «επιβάλλει» μια καθορισμένη τάση –εισόδου γι' αυτόν, εξόδου για τη συστοιχία των φωτοβολταϊκών συλλεκτών- και να λειτουργεί συνεχώς μ' αυτήν. Κάτι τέτοιο μπορεί να είναι επιθυμητό καθώς για ορισμένη προσπίπτουσα ακτινοβολία, υπάρχει ένα μόνο ζεύγος τάσης – έντασης στο οποίο το στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. (για τους συλλέκτες του μικροδικτύου, αυτό είναι 17,6 volt, 6,76A). Η τάση εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μπορεί να ρυθμιστεί από 125 έως και 250 volt, με το στοιχείο ελέγχου **Usoll-Konst**. Προκαθορισμένη ρύθμιση είναι τα 148 Volt.

-**τροφοδότηση με μέγιστη ισχύ**: Στην περίπτωση αυτή λειτουργεί ο ανιχνευτής μέγιστης ισχύος του αντιστροφέα (Mppt mode). Το κύκλωμα ελέγχου υπολογίζει συνεχώς την παραγόμενη ισχύ από τους συλλέκτες, και καθορίζει κάθε φορά την τιμή της τάσης που αντιστοιχεί στη μέγιστη για εκείνο το βαθμό ακτινοβολίας παραγόμενη ισχύ. Η ρύθμιση για τον τρόπο λειτουργίας γίνεται με το στοιχείο ελέγχου **Operation mode.**

4.1.3 Δυνατότητες ρύθμισης των στοιχείων ελέγχου για αποσύνδεση από το δίκτυο

Τα όρια των στοιχείων που φροντίζουν για την αποσύνδεση με το δίκτυο ώστε να μην συμβεί απομονωμένη λειτουργία, μπορούν να αλλάξουν ανάλογα με την συμπεριφορά του δικτύου. Παραδείγματος χάριν μπορούν να γίνουν πιο αυστηρά αν πρόκειται για ένα δίκτυο που έχει κοντά πολλούς άλλους αντιστροφείς που παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο. Αντίθετα μπορούν να γίνουν πιο ανεκτικά αν πρόκειται για ένα ιδιαίτερα ασταθές δίκτυο, νησιωτικό για παράδειγμα, όπου υπάρχουν συνεχείς βυθίσεις και αιχμές στην τάση, που κρατούν δευτερόλεπτα.

- Ελάχιστη τάση δικτύου: ρύθμιση της ελάχιστης τιμής που μπορεί να φτάσει η τάση στο δίκτυο, μέχρι την οποία ο αντιστροφέας δεν θα αποσυνδεθεί. Η ρύθμιση γίνεται με το στοιχείο ελέγχου **Uac-Min** και παίρνει τιμές από 180 έως 300 volt
- Μέγιστη τάση δικτύου: Η μέγιστη τιμή που μπορεί να φτάσει η τάση στο δίκτυο, ώστε να μην αποσυνδεθεί ο αντιστροφέας. Η ρύθμιση γίνεται με το στοιχείο ελέγχου **Uac-max** και παίρνει τιμές από 180 έως 300 volt.

- Ελάχιστη συχνότητα δικτύου: Η ελάχιστη τιμή της συχνότητας του δικτύου για να διακοπεί η λειτουργία του αντιστροφέα. Στοιχείο ελέγχου **Fac-Min** και τιμές από 45,5 έως 52 Hz
- Μέγιστη συχνότητα δικτύου: Στοιχείο ελέγχου **Fac-Max** και τιμές από 48 έως 54,5 Hz
- Μέγιστος ρυθμός μεταβολής της συχνότητας (διαφορικός έλεγχος). Το στοιχείο ελέγχου **dFac-Max** καθορίζει το μέγιστο ρυθμό dFac/dt τον οποίο μπορεί να ανεχθεί ο αντιστροφέας όταν τροφοδοτεί το δίκτυο. Ο ρυθμός αυτός είναι μια καλή ένδειξη για την ύπαρξη σφάλματος στο δίκτυο που μπορεί να οφείλεται στην αποσύνδεση μιας μεγάλης μονάδας, ή γενικότερα βλάβη που έχει ως αποτέλεσμα την αποσύνδεση του μέρους του δικτύου στο οποίο βρίσκεται ο αντιστροφέας. Ο ρυθμός αυτός μπορεί να πάρει τιμές από 0,005 έως 4 Hz/sec. Η εργοστασιακή ρύθμιση είναι 0,25 Hz/sec. **Στο εργαστήριο έχει ουσιαστικά απενεργοποιηθεί ο διαφορικός έλεγχος της συχνότητας με το να τεθεί στο ανώτατο όριο των 4 Hz/sec.**
- Μέγιστη αντίσταση δικτύου. Ο αντιστροφέας επιτρέπει ένα ανώτατο όριο της σύνθετης αντίστασης που «βλέπει» για το δίκτυο, προκειμένου να συνδεθεί σ' αυτό. Μια μεγάλη τιμή της αντίστασης αυτής είναι ένδειξη σφάλματος από την πλευρά του δικτύου ή κακής σύνδεσης αντιστροφέα και δικτύου (λόγω ενός πολύ μεγάλου καλωδίου για παράδειγμα). Η ρύθμιση γίνεται με το στοιχείο ελέγχου **Zac-Max** και επιτρέπει τιμές από 0 έως και 20 Ohm. Προκαθορισμένη τιμή 1,7 Ohm
- Μεταβολή της αντίστασης του δικτύου. Η αντίσταση που βλέπει ο αντιστροφέας θα αρχίσει να αυξάνει αν υπάρχει αστάθεια. Με το στοιχείο ελέγχου **dZac-Max** ρυθμίζεται το εύρος της μεταβολής από 0 έως 2 Ohm για ορισμένο χρονικό διάστημα που

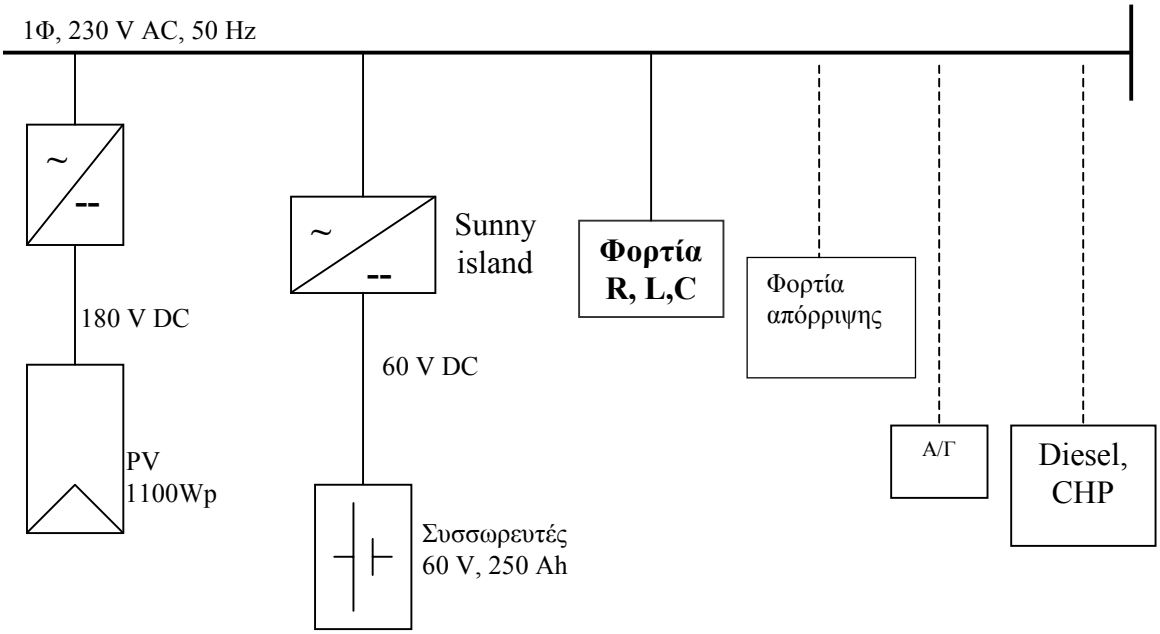
Στον παρακάτω πίνακα δίνονται συνοπτικά οι παραπάνω ρυθμίσεις:

Στοιχείο ελέγχου	**Μονάδα μέτρησης**	**Εύρος**		**Προκαθορισμένη τιμή**	**Περιγραφή**
		Από…	**Σε…**		
Upv-Start	V	125.0	250.0	180.0	Ελάχιστη τάση φ/β για την έναρξη του αντιστροφέα
T-Start	V	5.0	300.0	10.0	Χρόνος παραμονής σε τιμή Upv-Start για την έναρξη λειτουργίας
Upv-Stop	V	121.0	250.0	145.0	Ελάχιστη τάση φ/β για διακοπή αντιστροφέα
T-Stop	sec	1.0	300.0	2.0	Χρόνος μετά τη μέτρηση Upv-Stop τιμής για διακοπή
Usoll-Konst	V	125.0	250.0	148.0	Σταθερή τάση λειτουργίας φ/β
I-NiTest	mA	0	6000	4500	
Uac-Min	V	180	300	198	Ελάχιστη τάση δικτύου για διακοπή τροφοδότησης
Uac-Max	V	180	300	251	Μέγιστη τάση δικτύου για διακοπή τροφοδότησης
Fac-Min	Hz	45.5	52	49.18	Ελάχιστη συχνότητα δικτύου για διακοπή τροφοδότησης
Fac-Max	Hz	48.0	5405	50.19	Μέγιστη συχνότητα δικτύου για διακοπή τροφοδότησης
DFac-Max	Hz/sec	0.005	4	0.25	Μέγιστος ρυθμός μεταβολής συχνότητας για αποσύνδεση
Zac-Max	mOhm	0	20000	1700	Μέγιστη αντίσταση δικτύου για αποσύνδεση
Dzac	mOhm	0	2000	350	Μεταβολή της αντίστασης του δικτύου για αποσύνδεση

***Πίνακας 4.1* – Ρυθμίσεις ελέγχου αντιστροφέα φωτοβολταϊκών sunny boy**

4.2 Απομονωμένη λειτουργία του μικροδικτύου (island mode)

Για την ανάλυση της λειτουργίας αυτής παραβλέπουμε τελείως την ύπαρξη εξωτερικού δικτύου χαμηλής τάσης. Θεωρούμε ένα αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (microgrid), το οποίο στην παρούσα του μορφή έχει ως μοναδική πηγή ενέργειας τους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες, χρησιμοποιεί δε ως αποθηκευτικό μέσο της ενέργειας τους συσσωρευτές και ο έλεγχος του όλου δικτύου (συχνότητα, τάση, φορτία) γίνεται αποκλειστικά από τον αντιστροφέα των συσσωρευτών sunny island. Εναλλακτικά σε αυτή τη διάταξη μπορούν να συνδεθούν ανεμογεννήτρια μέσω αντιστροφέα ή και εφεδρική ντιζελογεννήτρια. Στην τοπολογία αυτή ο αντιστροφέας sunny island, διαθέτει δύο δυνατότητες λειτουργίας. Είτε ως η μοναδική πηγή ενέργειας που καθορίζει την τάση και την συχνότητα (RUN-U χωρίς έλεγχο droops), είτε ως RUN-U με έλεγχο droops. Η λειτουργία αυτή θα καλείται από εδώ και στο εξής grid forming operation (RUN-U).



Σχεδιάγραμμα 4.2 **– Απομονωμένη λειτουργία μικροδικτύου**

Η λειτουργία των φ/β συλλεκτών και του αντιστροφέα τους, γίνεται όπως περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα. Ο μόνιμα συνδεμένος αντιστροφέας sunny island παρέχει μια εναλλασσόμενη τάση 230 V/ 50 Hz συνεχώς στο μικροδίκτυο, απορροφώντας ισχύ από τους συσσωρευτές. Η απορρόφηση της ισχύος εξαρτάται από την ζητούμενη ισχύ από τα φορτία.

Στο ξεκίνημα της ημέρας τα φωτοβολταϊκά αναπτύσσουν τάση στα άκρα τους. Ο αντιστροφέας sunny boy, εντοπίζοντας την τάση αυτή, αλλά και την εναλλασσόμενη τάση του μικροδικτύου που υφίσταται συνεχώς από το sunny island, ετοιμάζεται να συνδεθεί με το δίκτυο και να παρέχει ισχύ. Εκτελώντας τους ελέγχους που προαναφέρθηκαν, συνδέεται με το μικροδίκτυο, παρέχοντας πλέον την ισχύ που παράγουν τα φωτοβολταϊκά.
Τώρα πλέον δημιουργείται ένα νέο ισοζύγιο ισχύος το οποίο μπορεί να παρασταθεί ως εξής:

$$\mathbf{Pinv = Ppv - Pload}$$
$$\mathbf{Qinv = Qload}$$

(παρεχόμενη ή απορροφούμενη ισχύς από τους συσσωρευτές μέσω αντιστροφέα) = (παρεχόμενη ισχύς από φωτοβολταϊκά) – (απορροφούμενη ισχύς από τα φορτία)

(παρεχόμενη ή απορροφούμενη άεργος ισχύς από τον αντιστροφέα)= (απορροφούμενη ή παρεχόμενη άεργος ισχύς από τα φορτία)

Όταν η κατανάλωση στο μικροδίκτυο είναι μεγαλύτερη από την εξερχόμενη ισχύ από τον αντιστροφέα sunny boy, τη διαφορά αυτή καλύπτει η εξερχόμενη ισχύς από τους συσσωρευτές. Στην περίπτωση που οι συσσωρευτές βρίσκονται σε χαμηλή κατάσταση φόρτισης και δεν πρέπει να παρέχουν άλλη ισχύ, ο αντιστροφέας sunny island μπορεί είτε να κόψει την παροχή σε ορισμένα φορτία, είτε να ενεργοποιήσει εφεδρικές γεννήτριες παραγωγής ισχύος (ντιζελογεννήτρια). Εάν καμία από τις παραπάνω δυνατότητες δεν είναι εγκατεστημένη, τότε κόβει τελείως την παρεχόμενη ισχύ, και σταματάει την τροφοδότηση του μικροδικτύου. Αυτόματα τότε αποσυνδέεται και ο αντιστροφέας των φωτοβολταϊκών.

Όταν η κατανάλωση στο μικροδίκτυο είναι μικρότερη από την παραγόμενη ισχύ των φωτοβολταϊκών, αυτό το πλεόνασμα ισχύος απορροφάται από τον αντιστροφέα sunny island και παρέχεται στους συσσωρευτές για να φορτισθούν. Εάν οι συσσωρευτές είναι πλήρως φορτισμένοι και δεν μπορούν να αποθηκεύσουν περισσότερη ενέργεια, ο αντιστροφέας sunny island δίνει εντολή στον αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών να μειώσει την παρεχόμενη ισχύ, ώστε να εξαλειφθεί η πλεονάζουσα ισχύς. Επίσης στην περίπτωση αυτή μπορεί να θέσει σε λειτουργία συγκεκριμένα φορτία απόρριψης όπως αντλίες ή αντιστάσεις για να απορροφηθεί η περίσσεια της ενέργειας.

Από την παραπάνω γενική περιγραφή φαίνεται λοιπόν ότι ο αντιστροφέας sunny island μπορεί να προσομοιαστεί με ένα σύγχρονο κέντρο ελέγχου ενέργειας, το οποίο χρησιμοποιεί ως βασικό εργαλείο για την ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας, τους συσσωρευτές και δευτερεύον τον έλεγχο φορτίων και γεννητριών.

4.3 Λεπτομερής εξέταση των δυνατοτήτων του Sunny island

Ο έλεγχος της λειτουργίας του αντιστροφέα sunny island γίνεται μέσω του πληκτρολογίου και της οθόνης που υπάρχουν πάνω στη συσκευή. Εναλλακτικά μπορεί να συνδεθεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή και να γίνονται οι ρυθμίσεις μέσω αυτού. Στο μικροδίκτυο του εργαστηρίου υπάρχει αυτή η δυνατότητα καθώς ο αντιστροφέας είναι συνδεδεμένος με ηλεκτρονικό υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Linux. Μέσω του τοπικού δικτύου του εργαστηρίου, μπορεί να γίνει ρύθμιση των παραμέτρων του αντιστροφέα από οποιονδήποτε υπολογιστή.

Κατά τη διαδικασία ελέγχου της τάσης του μικροδικτύου (grid –forming operation) RUN-U χωρίς έλεγχο droops, ο αντιστροφέας sunny island πρέπει να ικανοποιεί ταυτόχρονα δύο λειτουργίες:

- να κρατάει συνεχώς σταθερές την τάση και τη συχνότητα του δικτύου, απορροφώντας ή παρέχοντας ισχύ από τους συσσωρευτές, ή ενεργοποιώντας εξωτερικές συσκευές
- να φροντίζει για την σωστή φόρτιση-εκφόρτιση των συσσωρευτών ώστε να αποφευχθεί πρόωρη μείωση της διάρκειας ζωής τους.

4.3.1 Διαχείριση των συσσωρευτών

Ο αντιστροφέας sunny island χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο βασισμένο στη γραμμική σχέση μεταξύ τάσης ανοιχτοκύκλωσης και βαθμού φόρτισης των συσσωρευτών (SOC%). Η σχέση αυτή που υπολογίζεται από τον αντιστροφέα για τους συσσωρευτές που ελέγχει, εξάγεται από τις μετρήσεις που παίρνει κατά τη διάρκεια λειτουργίας του, ενώ οι συσσωρευτές φορτίζονται και εκφορτίζονται. Αφού καθοριστεί από τον χειριστή η τάση ανοιχτοκύκλωσης των συσσωρευτών στην κατάσταση πλήρους φόρτισης, ο αντιστροφέας υπολογίζει συνεχώς την χωρητικότητα των συσσωρευτών με βάση τη σχέση που έχει υπολογίσει προηγουμένως βάση των μετρήσεων. Έτσι αποφεύγεται η τεχνική της βαθιάς εκφόρτισης (τεστ χωρητικότητας) που συνήθως χρησιμοποιείται βάση του ρεύματος που εξάγεται μέχρι η τάση να φτάσει στο ελάχιστο επιτρεπτό σημείο, εξαντλώντας τους συσσωρευτές.

Παρακάτω δίνεται ο πίνακας με τις ρυθμίσεις για τον έλεγχο των συσσωρευτών και ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή των πιο σημαντικών.

Παράμετρος	Μονάδα μέτρησης	Ελάχιστο	Μέγιστο	Πρ. τιμή	Περιγραφή
501_Cbat nom	Ah	100	10000	350	Ονομαστική χωρητικότητα συσσωρευτών μετρημένη για ρυθμό εκφόρτισης C/10
502_Bat Type		0	2	2	Τύπος συσσωρευτών: 0: gel 1: Fleece (κλειστού τύπου;) 2: Lead-Acid (μολύβδου οξέως)
503_Ubat nom	V	54	60	60	Ονομαστική τάση συσσωρευτών
504_Ubat min	V	46	84	51	Ελάχιστη επιτρεπτή τάση συσσωρευτών
505_Ubat max	V	51	84	84	Μέγιστη επιτρεπτή τάση συσσωρευτών
506_acid density	Kg/lt	1,1	1,35	1,28	Ονομαστική πυκνότητα του διαλύματος του ηλεκτρολύτη
507_SOC ini	%	0	100	0	Ποσοστό εκφόρτισης των συσσωρευτών 0: Ο αντιστροφέας εκτιμά το ποσοστό εκφόρτισης σύμφωνα με την τάση αυτών
508_Tbat Sense		0	1	0	Αισθητήρας θερμοκρασίας συσσωρευτών 0: Μη εγκατεστημένος 1: Εγκατεστημένος
509_Tbat max	^{o}C	30	55	40	Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία συσσωρευτών
511_Bat Fan		0	1	0	Ανεμιστήρας δωματίου συσσωρευτών (μόνο για ανοιχτού τύπου lead-acid) συσσωρευτές 0: Μη εγκατεστημένος 1: Εγκατεστημένος
512_Acid Pump		0	1	0	Κυκλοφορητής ηλεκτρολύτη συσσωρευτών (για συσσωρευτές lead-acid ανοιχτού τύπου) 0: Μη εγκατεστημένος 1: Εγκατεστημένος
513_Circ time	sec	1	3600	300	Χρόνος λειτουργίας κυκλοφορητή ηλεκτρολύτη (για κάθε φορά ανάδευσης)
516_Circ Qd	%	0,1	50	10	Ποσοστό φόρτισης των συσσωρευτών στο οποίο αρχίζει η κυκλοφορία του ηλεκτρολύτη
518_tset full	days	1	180	14	Χρονική περίοδος μετά από την οποία πραγματοποιείται πλήρης φόρτιση (full-charge)
519_tset equal	days	7	365	180	Χρονική περίοδος μετά από την οποία πραγματοποιείται βελτιστοποιητική φόρτιση
520_U float	V	2,2	2,4	2,25	Τάση συντήρησης των συσσωρευτών (float charge ανά στοιχείο)
521_tVR charge	min	1	600	120	Διάρκεια κανονικής φόρτισης (normal charge για συσσωρευτές κλειστού τύπου ή gel)
522_tVR full	hour	1	20	5	Διάρκεια πλήρους φόρτισης (full charge για συσσωρευτές κλειστού τύπου ή gel)
523_tVR equal	hour	1	48	10	Διάρκεια βελτιστοποιητικής φόρτισης (equalizing charge για συσσωρευτές κλειστού τύπου ή gel)
524_UVR charge	V	2,25	2,6	2,4	Τάση κανονικής φόρτισης ανά στοιχείο (για συσσωρευτές κλειστού τύπου ή gel)
525_UVR charge full	V	2,25	2,6	2,4	Τάση πλήρους φόρτισης ανά στοιχείο (για συσσωρευτές κλειστού τύπου ή gel)

526_UVR charge equal	V	2,25	2,6	2,4	Τάση βελτιστοποιητικής φόρτισης (equal charge για συσσωρευτές κλειστού τύπου ή gel)
527_tcharge	min	1	600	90	Διάρκεια κανονικής φόρτισης (για συσσωρευτές μολύβδου – οξέως)
528_tcharge full	hour	1	20	5	Διάρκεια πλήρους φόρτισης (για συσσωρευτές μολύβδου – οξέως)
529_ tcharge equal	hour	1	48	10	Διάρκεια βελτιστοποιητικής φόρτισης (για συσσωρευτές μολύβδου – οξέως)
530_Ucharge	V	2,29	2,7	2,55	Τάση κανονικής φόρτισης ανά στοιχείο (για συσσωρευτές μολύβδου – οξέως) Η τάση πρέπει να ρυθμίζεται στα 2,45V σε περίπτωση εγκατεστημένου κυκλοφορητή ηλεκτρολύτη
531_Ucharge full	V	2,25	2,7	2,5	Τάση πλήρους φόρτισης ανά στοιχείο (για συσσωρευτές μολύβδου – οξέως) Η τάση πρέπει να ρυθμίζεται στα 2,45 V σε περίπτωση εγκατεστημένου κυκλοφορηιή ηλεκτρολύτη
532_Ucharge equal	V	2,25	2,7	2,45	Τάση βελτιστοποιητικής φόρτισης ανά στοιχείο (για συσσωρευτές μολύβδου – οξέως)
533_Stdby t beg	hour	0	23	0	Έναρξη χρόνου στον οποίο ενεργοποιείται η λειτουργία low battery mode
534_Stdby t end	hour	0	23	0	Λήξη χρόνου στον οποίο πραγματοποιείται η λειτουργία low battery mode
535_State StopT		0	10	2	Επίπεδο εκφόρτισης συσσωρευτή για την ενεργοποίηση της λειτουργίας low battery mode (διακοπή λειτουργίας αντιστροφέα για αποτροπή μεγαλύτερης εκφόρτισης των συσσωρευτών) 0: L4 1: L3 2: L2 3: L1 4: N4 5: N3 6: N2 7: N1 8: O1 9: O2 10: O3
536_Fan on del	min	0	1440	1	Χρονική υστέρηση της εκκίνησης του εξαεριστήρα του δωματίου συσσωρευτών
537_Fan off del	min	0	360	60	Χρονική υστέρηση της διακοπής του εξαεριστήρα του δωματίου συσσωρευτών
538_lloss nom	mA/ 100Ah	0	-100	-30	Ρεύμα διαρροής στους συσσωρευτές κατά τη διάρκεια της φόρτισης συντήρησης (float charge)
539_LineResist	**mOhms**	**0**	**500**	**0**	**Συνολική αντίσταση του καλωδίου των συσσωρευτών**

***Πίνακας 4.2* – Στοιχεία ελέγχου για την διαχείριση των συσσωρευτών του αντιστροφέα sunny island**

Ο αντιστροφέας μπορεί να οδηγήσει τρεις διαφορετικούς τύπους συσσωρευτών μολύβδου (ανοιχτού τύπου, κλειστού τύπου και gel) συνολικής χωρητικότητας μέχρι 10.000Ah. Φυσικά ένας μόνο τύπος συσσωρευτών επιτρέπεται να είναι συνδεμένος αφού ο καθένας έχει διαφορετικές απαιτήσεις (τάσεις) φόρτισης και εκφόρτισης.

Η συνολική τάση αυτών πρέπει να είναι από 54 έως και 60volt. Τα στοιχεία ελέγχου 504 και 505 καθορίζουν την ελάχιστη και τη μέγιστη επιτρεπτή τάση που μπορεί να έχουν οι συσσωρευτές. Στην πρώτη περίπτωση ο αντιστροφέας θα σταματήσει την εκφόρτιση αυτών και στη δεύτερη την φόρτιση, ώστε να μην καταστραφούν.

Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο των συσσωρευτών, απαιτούνται τρία διαφορετικά είδη φόρτισης: η περιοδική φόρτιση (float charge), η πλήρης φόρτιση (full charge) και η βελτιστοποιητική φόρτιση (equalizing charge).
Συγκεκριμένα για τους συσσωρευτές μολύβδου – οξέος ανοιχτού τύπου:

Για την περιοδική φόρτιση το στοιχείο ελέγχου 520 καθορίζει την τάση ανά δίβολτο στοιχείο που θα έχει αυτή (66-72 volt συνολικά). Η φόρτιση αυτή γίνεται περιοδικά όσο οι συσσωρευτές δεν εκφορτίζονται.

Για την κανονική φόρτιση το στοιχείο ελέγχου 530 ρυθμίζει την τάση ανα δίβολτο στοιχείο (από 2,29 έως 2,55volt), ενώ το στοιχείο 527 ρυθμίζει το χρόνο που διαρκεί αυτή.

Για την πλήρη φόρτιση το στοιχείο ελέγχου 531 ρυθμίζει την τάση με την οποία θα γίνεται αυτή, ενώ το στοιχείο 528 ρυθμίζει το χρονικό διάστημα που θα κρατά αυτή.

Αντίστοιχες ρυθμίσεις φαίνονται στον πίνακα και για τους υπόλοιπους τύπους συσσωρευτών.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί ο αντιστροφέας για να συνδυάσει τις παραπάνω διαδικασίες έχει ως εξής:

Οι συσσωρευτές βρίσκονται συνήθως σε μια διαδικασία φόρτισης συντήρησης με τάση 2,23 volts/cell. Όταν η στάθμη φόρτισης πέσει κάτω από το 70% πραγματοποιείται κανονική φόρτιση με τάση και χρόνο που ορίζονται παραπάνω.

Μια διαδικασία πλήρους φόρτισης ξεκινά κάθε 14 ημέρες ή όταν πραγματοποιηθούν 8 κανονικές φορτίσεις (όποιο από τα δύο συμβεί πρώτο). Η τάση και ο χρόνος της πλήρους φόρτισης καθορίζονται παραπάνω.

Διαδικασία βελτιστοποιητικής φόρτισης πραγματοποιείται κάθε 180 ημέρες ή έπειτα από 30 κανονικές φορτίσεις (όποιο από τα δύο συμβεί πρώτο), σύμφωνα με την τάση και το χρόνο που έχουν καθοριστεί.

Για τον πλήρη έλεγχο των συσσωρευτών ο αντιστροφέας διαθέτει έξοδο για αισθητήρα της θερμοκρασίας αυτών. Ανάλογα της απόκλισης της θερμοκρασίας των συσσωρευτών από την τιμή αναφοράς των 20 ^{o}C, ο αντιστροφέας κάνει αντιστάθμιση των τάσεων φόρτισης και εκφόρτισης ως εξής:

Πάνω από τους 20 ^{o}C οι τάσεις που ορίζονται παραπάνω μειώνονται κατά 4 mV για κάθε βαθμό Κελσίου.

Κάτω από τους 20 ^{0}C, οι τάσεις αυξάνονται κατά 4mV/^{0}C

Η ρύθμιση γίνεται με τα στοιχεία ελέγχου 508,509 και εάν είναι διαθέσιμος ένας αισθητήρας τότε η μέγιστη θερμοκρασία των συσσωρευτών μπορεί να κυμανθεί από 30 έως 55 ^{0}C. Όταν φτάσει αυτό το όριο, σαν συνέπεια μιας παρατεταμένης φόρτισης, ο αντιστροφέας σταματάει να φορτίζει τους συσσωρευτές αν δεν είναι διαθέσιμος ανεμιστήρας του δωματίου που βρίσκονται.

Στην τελευταία περίπτωση, το στοιχείο ελέγχου 511 μπορεί να ενεργοποιήσει τον ανεμιστήρα για την μείωση της θερμοκρασίας των συσσωρευτών. Ο ανεμιστήρας εξάλλου ενεργοποιείται και όταν γίνεται πλήρη ή βελτιστοποιητική φόρτιση ώστε να απομακρύνεται το υδρογόνο που πιθανόν παράγεται κατά τη φόρτιση. Η ενεργοποίηση του ανεμιστήρα καθώς και η διακοπή του μπορούν να γίνουν με χρονική υστέρηση με τα στοιχεία ελέγχου 536, 537. Οι ρυθμίσεις αυτές είναι απαραίτητες για να αποφευχθεί υπερθέρμανση των συσσωρευτών, πράγμα που μειώνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους.

Για την αποφυγή εξάλλου του φαινομένου της καθίζησης (stratification), ο αντιστροφέας διαθέτει ρύθμιση για τον έλεγχο αντλίας για την περιοδική ανάδευση του ηλεκτρολύτη. Εάν είναι διαθέσιμη μια τέτοια αντλία (στοιχείο 512), μπορεί να ενεργοποιηθεί για διάστημα από 1 έως 3600sec (στοιχείο ελέγχου 513), κάθε φορά που οι συσσωρευτές φορτίζονται με ένα καθορισμένο ποσοστό της χωρητικότητάς τους (στοιχείο ελέγχου 516). Σε ένα μικροδίκτυο του μεγέθους που εξετάζεται, μία τέτοια διαδικασία μπορεί να αποφευχθεί, αν ρυθμιστεί σωστά η περιοδική βελτιστοποιητική φόρτιση των συσσωρευτών. Για περισσότερες όμως συστοιχίες συσσωρευτών, η αντλία του ηλεκτρολύτη, μπορεί να απαλλάξει το

σύστημα από την σπατάλη ενέργειας για βελτιστοποιητική φόρτιση, καθώς η ενέργεια που απαιτείται στην τελευταία περίπτωση μπορεί να είναι σημαντική.

Οι παραπάνω ρυθμίσεις αφορούν την διαδικασία της φόρτισης των συσσωρευτών. Απαιτείται προσεκτική ρύθμιση για να αποφευχθεί η ελάττωση του χρόνου ζωής τους. Αυτό που είναι πιο συνηθισμένο στα αυτόνομα δίκτυα ωστόσο, είναι η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά ή τις ανεμογεννήτριες να είναι λιγότερη από τη ζητούμενη. Γι' αυτό πιο σημαντική είναι η σωστή διαχείριση της εκφόρτισης των συσσωρευτών. Παρατεταμένες και βαθιές εκφορτίσεις έχουν ως συνέπεια τη δραστική μείωση του χρόνου ζωής και της αποθηκευτικής ικανότητας των συσσωρευτών μολύβδου-οξέως.

Η μέτρηση του βαθμού εκφόρτισης γίνεται μετρώντας την τάση των συσσωρευτών (πίνακας 2.2, σελ. 74). Για τον υπολογισμό αυτόν, με την αναβάθμιση του firmware, προστέθηκε ο διορθωτικός παράγοντας **539_LineResist**, ώστε να λαμβάνεται υπ' όψιν και η πτώση τάσης που προκαλείται από την αντίσταση του καλωδίου των συσσωρευτών. Η αντίσταση αυτή μπορεί να πάρει τιμές από 0 μέχρι 500 mOhms.

Σύμφωνα με την τάση αυτή ο αντιστροφέας sunny island χωρίζει την κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών σε 11 στάθμες (SOC). Σε κάθε μια κατάσταση ενεργοποιεί διάφορες λειτουργίες για να τους επαναφέρει στα επιθυμητά όρια φόρτισης.

Κατάσταση		
L4,L3,L2,L1	Χαμηλή φόρτιση	Μειωμένη διαθεσιμότητα και αύξηση γήρανσης
N4,N3,N2,N1	Κανονική φόρτιση	Κανονική διαθεσιμότητα ενέργειας
O1,O2,O3	Υπερφόρτιση	Υπερφόρτιση και αύξηση γήρανσης

Πίνακας 4.3 **– Κατηγοριοποίηση επιπέδων φόρτισης των συσσωρευτών του αντιστροφέα**

Εξετάζοντας πάντα την περίπτωση που το σύστημα είναι απομονωμένο από το κεντρικό δίκτυο, μια σειρά από δυνατότητες υπάρχουν ώστε ο αντιστροφέας να χειριστεί ευέλικτα την κάθε κατάσταση χωρίς να διακόψει την τάση στο μικροδίκτυο. Αν ωστόσο ενώ έχουν φθάσει οι συσσωρευτές σε κατάσταση πολύ χαμηλής φόρτισης, όλες οι πιθανές ενέργειες εξαντληθούν ή δεν είναι διαθέσιμες, τότε διακόπτεται η λειτουργία του για να προστατευθούν οι συσσωρευτές. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται αναλυτικά η συμπεριφορά του αντιστροφέα σε κάθε κατάσταση φόρτισης.

SOC	**Κατάσταση**	**Συστάσεις**	**Πιθανά μέτρα ελέγχου**
O3	Πολύ υψηλή υπερφόρτιση	Άμεση διακοπή φόρτισης	Διακοπή όλων των πηγών ενέργειας μέσω της αύξησης της συχνότητας
O2	υψηλή υπερφόρτιση	Δραστική μείωση του ρεύματος φόρτισης	Μικρή αύξηση της συχνότητας για να βγουν εκτός λειτουργίας οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών
O1	υπερφόρτιση	Μείωση του ρεύματος φόρτισης	Ενεργοποίηση απορριπτικού φορτίου
N1	Πολύ υψηλή εφεδρεία αποθηκευμένης ενέργειας	Καμία	Διακοπή απορριπτικού φορτίου
N2	Υψηλή εφεδρεία αποθηκευμένης ενέργειας	Ειδοποίηση βαθμού φόρτισης.	Διακοπή φορτίων που δεν χρησιμοποιούνται συνέχεια ή μείωση της κατανάλωσης
N3	Κανονική εφεδρεία αποθ. ενέργειας	Μείωση φορτίων ή μελλοντική φόρτιση	Έναρξη εφεδρικής γεννήτριας ή διακοπή συγκεκριμένων φορτίων
N4	Χαμηλή εφεδρεία ενέργειας	Δραστική μείωση φορτίων ή άμεση φόρτιση των συσσωρευτών	Άμεση έναρξη εφεδρικής γεννήτριας ή διακοπή όλων των μη αναγκαίων φορτίων
L1	Αρχή γήρανσης συσσωρευτών	Λειτουργία μόνο των επειγόντων φορτίων, άμεση φόρτιση	Άμεση έναρξη εφεδρικής γεννήτριας και διακοπή όλων των φορτίων εκτός από τα

			επείγοντα
L2	Αυξημένη γήρανση συσσωρευτών	Διακοπή όλων των καταναλώσεων, άμεση φόρτιση	Άμεση έναρξη εφεδρικής γεννήτριας ή διακοπή της τάσης στο δίκτυο
L3	Ραγδαία γήρανση συσσωρευτών	Μείωση αυτοκατανάλωσης αντιστροφέα, άμεση φόρτιση	Αντιστροφέας σε λειτουργία αναμονής
L4	Καταστροφή του ενεργού υλικού	Άμεση μείωση αυτοκατανάλωσης, άμεση φόρτιση	Οριστική διακοπή αντιστροφέα

***Πίνακας 4.4* – Στάθμες φόρτισης των συσσωρευτών του αντιστροφέα και αντίστοιχοι χειρισμοί**

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται το πώς ο αντιστροφέας χειρίζεται τους συσσωρευτές. Όταν οι συσσωρευτές είναι σε χαμηλή κατάσταση φόρτισης, ο αντιστροφέας είτε ενεργοποιεί γεννήτρια ντίζελ που είναι συνδεδεμένη στο μικροδίκτυο και ελέγχεται από αυτόν μέσω των ρελέ του, είτε αρχίζει να διακόπτει φορτία. Η τελευταία ρύθμιση είναι πολύ σημαντική, ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχει εφεδρική γεννήτρια και τα φορτία του μικροδικτύου είναι ποικίλα. Σ' αυτήν την περίπτωση ορισμένες γραμμές του μικροδικτύου μπορούν να ελεγχθούν από τα ρελέ του αντιστροφέα, οπότε και να αποσυνδέονται στην περίπτωση χαμηλής φόρτισης των συσσωρευτών. Οι γραμμές αυτές μπορούν να τροφοδοτούν φορτία τα οποία δεν επηρεάζονται από μια απότομη διακοπή του ρεύματος. Αν ακόμη και με αυτό το μέτρο εξακολουθεί να υπάρχει κατανάλωση χωρίς αντίστοιχη αναπλήρωση από τα φωτοβολταϊκά ή άλλες πηγές, τότε ο αντιστροφέας διακόπτει τη λειτουργία του, κόβει τελείως την τάση στο μικροδίκτυο και σε ακόμη χειρότερη περίπτωση σταματάει ακόμη και την τροφοδότηση του με ρεύμα, για να μην αδειάσουν τελείως οι συσσωρευτές. Η ρύθμιση του επιπέδου φόρτισης στο οποίο θα διακοπεί η λειτουργία του αντιστροφέα ρυθμίζεται με το στοιχείο 535_State StopT. Η διακοπή γίνεται όταν ο αντιστροφέας, ενώ έχει φθάσει στο επίπεδο αυτό, για χρόνο 5 λεπτών δεν απορροφήσει ελάχιστο ρεύμα 1A για να φορτίσει τους συσσωρευτές.

Αντίθετα όταν υπάρχει μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας στο μικροδίκτυο από τα φωτοβολταϊκά ή άλλες πηγές από την κατανάλωση ο αντιστροφέας απορροφά αυτή την πλεονάζουσα ενέργεια φορτίζοντας τους συσσωρευτές. Αν οι συσσωρευτές φορτισθούν πλήρως, τότε ο αντιστροφέας διακόπτει την τροφοδότηση αυτών με ισχύ. Σ' αυτήν την περίπτωση πρέπει να κρατήσει την τάση και τη συχνότητα του δικτύου με άλλους τρόπους. Ένας εύκολος τρόπος είναι η ύπαρξη στο μικροδίκτυο ενός καταναλωτικού απορριπτικού φορτίου. Συνήθη τέτοια φορτία είναι π.χ οι αντλίες που μαζεύουν νερό από ένα πηγάδι. Σε ένα εργαστηριακό μικροδίκτυο, ένα απορριπτικό φορτίο μπορεί να είναι αντιστάσεις ή φώτα. Το φορτίο αυτό είναι συνδεμένο στο μικροδίκτυο με ξεχωριστή γραμμή, η οποία ελέγχεται από ένα ρελέ του αντιστροφέα, και ενεργοποιείται σε περίπτωση πλεονάζουσας ισχύος. Αν δεν απορροφηθεί η πλεονάζουσα ισχύς και με αυτό το μέτρο τότε ο αντιστροφέας μπορεί μέσω του sunny boy control να μειώσει την παραγόμενη ισχύ από τα φωτοβολταϊκά ή και να τη σταματήσει τελείως. Σε περίπτωση που είναι συνδεδεμένοι άλλοι αντιστροφείς φωτοβολταϊκών τους οποίους δεν μπορεί να ελέγξει μέσω των πρωτοκόλλων επικοινωνίας, υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της ισχύος μέσω της συχνότητας. Σ' αυτή την περίπτωση, ο αντιστροφέας διαπιστώνοντας πλήρη φόρτιση των συσσωρευτών και απομονωμένη λειτουργία μικροδικτύου, αυξάνει την συχνότητα στο δίκτυο. Ο αντιστροφέας των φωτοβολταϊκών μειώνει την ισχύ εξόδου του αναλογικά με την αύξηση της συχνότητας, εάν είναι βέβαια προγραμματισμένος να λειτουργεί με ένα τέτοιο έλεγχο. (βλέπε παρ. 4.8)

Αφού εξηγήθηκε το πώς γίνεται ο έλεγχος των συσσωρευτών από τον αντιστροφέα είναι το κατάλληλο σημείο για να αναλυθεί το πώς γίνεται και ο έλεγχος της τάσης και της συχνότητας του μικροδικτύου.

4.3.2 Έλεγχος τάσης και συχνότητας από τον αντιστροφέα

Εξετάζοντας πάντα την περίπτωση απομονωμένης λειτουργίας του μικροδικτύου από το κεντρικό δίκτυο χαμηλής τάσης, ο αντιστροφέας sunny island είναι δυνατόν να λειτουργήσει με δύο διαφορετικούς τρόπους:

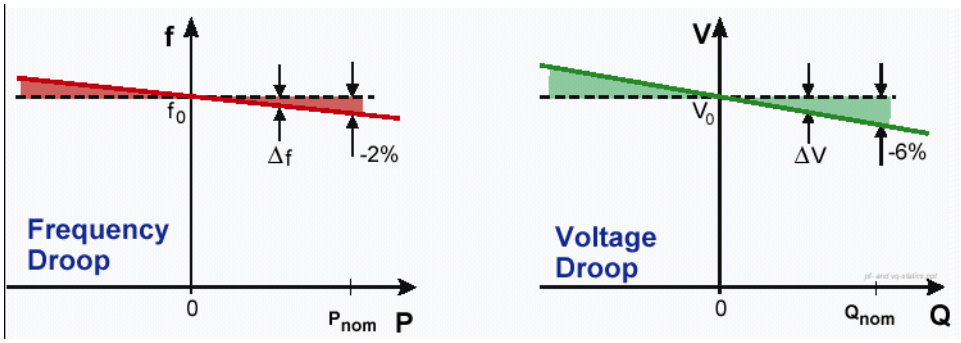
- λειτουργία RUN-U χωρίς έλεγχο droops, με τον αντιστροφέα να καθορίζει αποκλειστικά την τάση και την συχνότητα, στην ονομαστική τους τιμή (καμία άλλη πηγή δεν καθορίζει την τάση και την συχνότητα)
- λειτουργία RUN-U με έλεγχο droops, με τον αντιστροφέα να ρυθμίζει την τάση και τη συχνότητα σύμφωνα με τις καμπύλες στατισμού του, δηλαδή σύμφωνα με την ενεργό και άεργο ισχύ που παρέχει

Σε λειτουργία τροφοδότησης RUN-U (χωρίς έλεγχο droops), ο αντιστροφέας προσπαθεί να κρατά την τάση και τη συχνότητα του δικτύου στις ονομαστικές τιμές που έχουν καθοριστεί. Εάν υπάρχει και δεύτερος αντιστροφέας sunny island, υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν κοινή συστοιχία συσσωρευτών και να οριστούν ως πρωτεύον και δευτερεύον αντίστοιχα.

Σε λειτουργία τροφοδότησης RUN-U με έλεγχο droops, ο αντιστροφέας ανταλλάσσει ενεργό και άεργο ισχύ βασιζόμενος στις κλίσεις στατισμού αυτού. Ανάλογα με την ενεργό και άεργο ισχύ που απορροφά ή παρέχει (P/P_N και Q/Q_N αντίστοιχα εκφρασμένες ως κλάσμα της ονομαστικής) θα μεταβάλλει την συχνότητα και την τάση εξόδου κατά Δf και ΔQ, όπως προκύπτουν από το παρακάτω διάγραμμα.

Στην εικόνα 4.1 φαίνονται οι χαρακτηριστικές P-f και Q-V του αντιστροφέα sunny island, οι οποίες και δεν διαφέρουν σε τίποτα από αυτές μιας σύγχρονης γεννήτριας που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2.3.5. Για συγκεκριμένη τιμή της κλίσης στατισμού droopf και ονομαστική συχνότητα f_0, ο αντιστροφέας αποκλίνει από την ονομαστική του συχνότητα κατά Δf που αντιστοιχεί, σύμφωνα με την κλίση, στην ενεργό ισχύ ΔP που ανταλλάσσει με το απομονωμένο μικροδίκτυο.

Αντίστοιχος έλεγχος γίνεται και για την τάση. Για δεδομένη ονομαστική τάση V_0 και τιμή της κλίσης τάσεως – αέργου ισχύος droopV, ο αντιστροφέας αποκλίνει από την ονομαστική του τάση V_0 κατά ΔV που αντιστοιχεί, σύμφωνα με την καμπύλη, στην τιμή ΔQ που ανταλλάσσει με το απομονωμένο μικροδίκτυο.



Εικόνα 4.1 – Χαρακτηριστικές κλίσεις στατισμού P-f και Q-V του αντιστροφέα συσσωρευτών

Ο έλεγχος αυτός φαίνεται αρκετά απλός καθώς μόνο μία πηγή ελέγχει την τάση. Ταυτόχρονα η άλλη πηγή ενέργειας του μικροδικτύου, ο αντιστροφέας των φωτοβολταϊκών, δεν συνεισφέρει καθόλου σε αυτόν τον έλεγχο, καθώς είναι ικανός να παρέχει μόνο ισχύ και μάλιστα με μη ελεγχόμενο ρυθμό.

Εάν στο μικροδίκτυο συνδέονται περισσότερες από μια πηγές ενέργειας οι οποίες διαθέτουν έλεγχο droops, συναντάται η κατάσταση λειτουργίας RUN-U_EXT.

Ένα πρώτο παράδειγμα είναι η ύπαρξη στο μικροδίκτυο μιας γεννήτριας diesel ή μιας μικροτουρμπίνας. Στην περίπτωση αυτή, θεωρητικά, ο έλεγχος γίνεται και από τις δύο αυτές μονάδες, αναλογικά από την κάθε μια όπως ορίζουν οι καμπύλες P-f και Q-V της κάθε μιας. Μέχρι τέσσερις αντιστροφείς sunny island μπορούν να λειτουργήσουν παράλληλα σε μία φάση στην κατάσταση αυτή, αριθμός που έχει τεθεί ως όριο σταθερής λειτουργίας.

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός δικτύου που περιλαμβάνει δύο αντιστροφείς φαίνεται στην εικόνα 2.25, σελ.53. Εάν οι αντιστροφείς συνδέονται μέσω των επαγωγών L1,L2 και η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο τάσεων είναι δ, τότε η ενεργός ισχύς που ρέει είναι:

$$P = \frac{V1 \cdot V2}{\omega \cdot (L1 + L2)} \cdot \sin(\delta)$$

και η άεργος

$$Q = \frac{V1^2}{\omega \cdot (L1 + L2)} - \frac{V1 \cdot V2}{\omega \cdot (L1 + L2)} \cdot \cos(\delta)$$

Ροή ενεργού ισχύος μεταξύ των δύο πηγών προκαλείται από τη διαφορά φάσης δ, ενώ ροή αέργου ισχύος από τη διαφορά στο μέτρο των τάσεων των δύο αντιστροφέων. Ο καταμερισμός του φορτίου στους δύο αντιστροφείς προκύπτει από τα σημεία τομής των κλίσεων των δύο αντιστροφέων με την κοινή συχνότητα λειτουργίας (σχ. 2.27, σελ. 55).

4.3.3 Έλεγχος τάσης – συχνότητας από την γεννήτρια (RUN-I)

Αναφερθήκαμε μέχρι τώρα στην περίπτωση που στο μικροδίκτυο υπάρχει μόνο μια ελεγχόμενη μονάδα ισχύος, ο αντιστροφέας sunny island, και μια μη ελεγχόμενη ο αντιστροφέας των φωτοβολταϊκών sunny boy. Αν και οι προαναφερόμενες ρυθμίσεις επιτρέπουν ένα ευέλικτο χειρισμό καταναλώσεων και μονάδων παραγωγής για τον έλεγχο της τάσεως και της συχνότητας, στην πραγματικότητα, ένα μικροδίκτυο με τα δύο αυτά στοιχεία δύσκολα θα μπορούσε να εγγυηθεί αξιόπιστη και αδιάκοπη λειτουργία.

Διάφοροι λόγοι που σχετίζονται με τις πραγματικές εφαρμογές ενός μικροδικτύου, από μια οικία μέχρι ένα συνοικισμό, θα μπορούσαν να εξαντλήσουν τις δυνατότητες αυτές και να προκαλέσουν black out, είτε λόγω υπερφόρτωσης είτε πιο συχνά λόγω ανεπάρκειας σε ισχύ. Όσο και να σχεδιαστεί ένα σύστημα για να αντέχει σε παρατεταμένες ημέρες συννεφιάς, οπότε και η παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά είναι μηδενική, η ικανότητα αποθήκευσης των συσσωρευτών είναι περιορισμένη.

Για το παράδειγμα του μικροδικτύου του εργαστηρίου η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να υπολογιστεί από την συνολική χωρητικότητα των συσσωρευτών, πολλαπλασιασμένη επί ένα συντελεστή 0,8 αφού ο αντιστροφέας επιτρέπει εκφόρτιση αυτών μέχρι βάθους 80%, και πολλαπλασιασμένη πάλι επί ένα συντελεστή 0,8~0,9 που είναι ο συντελεστής απόδοσης των συσσωρευτών. Συνεπώς έχουμε C=15Kwh*0,8*0,8=9,6KWh

Προφανώς τέτοια μεγέθη ενέργειας μπορούν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες μιας οικίας το πολύ για 2 ή 3 ημέρες.

Η πιο σημαντική δυνατότητα του αντιστροφέα sunny island λοιπόν, είναι η ικανότητα του να διαχειρίζεται γεννήτριες diesel ή γεννήτριες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Ο σχεδιαστής ενός τέτοιου αντιστροφέα λαμβάνει υπ' όψιν του ότι θα λειτουργεί σίγουρα σε ένα μικροδίκτυο που περιλαμβάνει γεννήτρια. Έτσι μπορεί να εξασφαλιστεί η αδιάκοπη λειτουργία του μικροδικτύου, χωρίς να υπάρχει εξάρτηση μόνο από τα φωτοβολταϊκά ή τις ανεμογεννήτριες.

Μιλώντας πάντα για την περίπτωση όπου ο αντιστροφέας λειτουργεί ελέγχοντας το δίκτυο χωρίς έλεγχο μέσω droops, ο αντιστροφέας αλλάζει κατάσταση λειτουργίας όταν εκκινεί την γεννήτρια, από RUN-U σε RUN-I. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας καθορίζεται με το στοιχείο 602_Genset type: grid-forming. Η γεννήτρια ορίζεται ως πηγή ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας του δικτύου, οπότε η σύνδεση αυτής είναι απαραίτητο να αλλάξει τον τρόπο λειτουργίας του αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας μέσω θύρας RS-232 μπορεί να συνδεθεί με γεννήτρια diesel ή γεννήτρια συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP), και να ελέγχει την ισχύ εξόδου αυτής. Ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών και τη ζητούμενη ισχύ από τα φορτία, ο αντιστροφέας δίνει εντολή στην γεννήτρια να αυξάνει ή να μειώνει το φορτίο της.

Βασική παράμετρος σ' αυτή την κατάσταση είναι το ρεύμα που θα απορροφάει ο αντιστροφέας για τη φόρτιση των συσσωρευτών. Όταν η συχνότητα στο δίκτυο αυξάνεται το ρεύμα αυτό μπορεί να μεγαλώνει, ώστε να απορροφηθεί ενεργός ισχύς και να μειωθεί ξανά η συχνότητα της γεννήτριας. Ο έλεγχος του ρεύματος αυτού μπορεί να γίνει και ως συνάρτηση του ρεύματος εξόδου της γεννήτριας. Εναλλακτικά μπορεί να γίνει ως συνάρτηση τόσο της συχνότητας της γεννήτριας όσο και του ρεύματος αυτής. Οι ρυθμίσεις αυτές γίνονται με το στοιχείο ελέγχου 604.

Έχει μεγάλη σημασία να τονισθεί ότι στην περίπτωση αυτή ο αντιστροφέας μπορεί να ρυθμιστεί για να ελέγχει μόνο το ρεύμα που θα απορροφά ή θα διοχετεύει στο δίκτυο, και όχι τη συχνότητα ή την τάση του δικτύου. Έτσι, η φόρτιση των συσσωρευτών μπορεί να γίνει σύμφωνα με τις εντολές του χειριστή του συστήματος και όχι αυτόματα από τον αντιστροφέα (π.χ. να γίνει μια πλήρης φόρτιση χωρίς διακοπή).

Ο παρακάτω πίνακας δίνει αναλυτικά τις ρυθμίσεις για τον έλεγχο μιας γεννήτριας από τον αντιστροφέα.

Η ρύθμιση αυτή γίνεται με το στοιχείο ελέγχου 602 (genset type: grid forming). Τότε ο αντιστροφέας ακολουθεί την τάση και συχνότητα της γεννήτριας (RUN-I operation).

Παράμετρος	Μον. μέτρησης	Min	Max.	default	Περιγραφή
601_GenSet Oper		0	3	0	0: Auto. Η γεννήτρια ξεκινά και σταματά αυτόματα από το sunny island 1: Man.Start: Η γεννήτρια ξεκινά αμέσως 2: Man.Stop: Η γεννήτρια σταματά αμέσως 3: Man.Ackn: περιπτώσεις καθυστέρησης λόγω σφάλματος
602_GenSet Type		0	12	0	0: Καμία άλλη πηγή ισχύος στο δίκτυο 1: Grid forming, η γεννήτρια που υπάρχει ρυθμίζει την τάση και συχνότητα 2: Grid tied, ο αντιστροφέας sunny island ρυθμίζει την τάση και την συχνότητα 3: Mains: Κεντρικό δίκτυο 4: BHKW-Mains: Ταυτόχρονη λειτουργία με γεννήτρια Ecopower CHP και κεντρικό δίκτυο 5: BHKW-Island: ταυτόχρονη λειτουργία με γεννήτρια Ecopower CHP 6: Mains form: Ταυτόχρονη λειτουργία με γεννήτρια που ελέγχει την τάση και το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο 7: fast grid form: Λειτουργία με γεννήτρια που συνδέεται στο κεντρικό δίκτυο. Ζεύξη – απόζευξη του αντιστροφέα χωρίς διακοπή 8: fast Mains: Σύνδεση του αντιστροφέα στο κεντρικό δίκτυο. Ζεύξη – απόζευξη του αντιστροφέα με το δίκτυο χωρίς διακοπή 9: fast Mains form: Ταυτόχρονη λειτουργία με γεννήτρια και κεντρικό δίκτυο. Ζεύξη – απόζευξη αντιστροφέα χωρίς διακοπή. **10: DroopMains. Σύνδεση με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο και λειτουργία με βάση τις καμπύλες στατισμού (420,421)** **11: DroopGen Παράλληλη σύνδεση με γεννήτρια ικανή να λειτουργεί με κλίσεις στατισμού** **12: DroopGenMains. Σύνδεση με γεννήτρια ικανή να λειτουργεί σύμφωνα με καμπύλες στατισμού και με το ηλεκτρικό δίκτυο**
603_GenSet Interf		0	4	0	0: None: Η γεννήτρια δεν ελέγχεται από τον αντιστροφέα 1: Typ 1: αυτόματη εκκίνηση με ρελέ K1+K2 2: Typ 2: λειτουργία - εκκίνηση γεννήτριας με τρεις επαφές K1,K2,K5 3: Typ 3: εκκίνηση – διακοπή γεννήτριας με τρεις επαφές K1,K2,K5 4: EcoPower: Γεννήτρια Ecopower CHP
604_GenSet Ctrl		0	3	0	Ο αντιστροφέας μειώνει το εισερχόμενο ρεύμα (σε λειτουργία RUN-I για την φόρτιση των συσσωρευτών σύμφωνα με: 0: OFF 1: F_MAINS: συναρτήσει της συχνότητας της γεννήτριας 2: I_DIESEL: συναρτήσει του ρεύματος της γεννήτριας 3: BOTH: συναρτήσει ρεύματος και συχνότητας της γεννήτριας
605_GenStRetr		1	30	5	Μέγιστος αριθμός προσπαθειών επανεκκίνησης της γεννήτριας πριν την κατάσταση Fail locked
606_CurTrfRatio	Ain/5 Aout	0	1000	5	Λόγος υποβιβασμού του μετασχηματιστή ρεύματος για την μέτρηση του ρεύματος της γεννήτριας (σε A ανά 5^A)
607_Igen max	A	0	500	0	Μέγιστο ρεύμα εξόδου ανά φάση της γεννήτριας
609 GenLoad min		0	100		
610_tGen glow	Sec	1	180	15	Χρονικό διάστημα ελέγχου του ρελέ για την προθέρμανση της γεννήτριας
611tGen crank	sec	1	60	10	Χρονικό διάστημα ελέγχου του ρελέ για την εκκίνηση της γεννήτριας
612_tGen warm	sec	1	900	15	Χρόνος προθέρμανσης της γεννήτριας
613_tGen minrun	min	1	180	5	Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας της γεννήτριας

614_tGen cool					Χρόνος ψύξης της γεννήτριας
615_tGen stop					Χρονικό διάστημα ελέγχου του ρελέ για τη διακοπή λειτουργίας της γεννήτριας
616_tGen lock	min	1	180	5	Χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο η γεννήτρια δεν μπορεί να επανεκκινήσει από τον αντιστροφέα, έπειτα από την διακοπή λειτουργίας της
617_tGen fail					Χρονικό διάστημα στο οποίο η γεννήτρια δεν μπορεί να επαννεκινήσει με εντολή του αντιστροφέα, έπειτα από διακοπή της λειτουργίας της λόγω σφάλματος
618_tGen faillock					Χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο η γεννήτρια δεν μπορεί να επανεκκινήσει με εντολή του αντιστροφέα μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό σφαλμάτων της παραμέτρου 605_GenStRetr
625_PldL GenOn	%	-100	100	0	Ποσοστό(%) της κανονικής ισχύος σε μια φάση για την έναρξη λειτουργίας της γεννήτριας ή την έναυση των ρελέ K5 ή K6
626_PldL GenOff	%	-100	100	0	Ποσοστό(%) της κανονικής ισχύος σε μια φάση για την διακοπή λειτουργίας της γεννήτριας ή την διακοπή των ρελέ K5 ή K6
627_PldS GenOn	%	-100	100	0	Κατώφλι του ποσοστού της κανονικής ισχύος βασισμένο στην αθροιστική τριφασική ισχύ, για την εκκίνηση της γεννήτριας ή των ρελέ K5 ή K6
628_PldS GenOff	%	-100	100	0	Κατώφλι του ποσοστού της κανονικής ισχύος βασισμένο στην αθροιστική τριφασική ισχύ, για την διακοπή λειτουργίας της γεννήτριας ή των ρελέ K5 ή K6
629_TavgLdLx	sec	5	60	10	Μέσος χρόνος για τον υπολογισμό ισχύος ανά φάση
630_TavgLdSum	min	1	20	1	Μέσος χρόνος για τον υπολογισμό της ισχύος σε τριφασικό δίκτυο
631_PldLzMin	%	0	100	60	Ελάχιστο όριο κατάστασης φόρτισης (SOC), στο οποίο η γεννήτρια ecopower θα ξεκινά
632_PldLzMax	%	0	100	85	Μέγιστο όριο της κατάστασης φόρτισης του συσσωρευτή, στο οποίο η γεννήτρια ecopower δεν ξεκινά ποτέ
633_PConsMin	W	0	2000	1000	Ελάχιστο όριο της καταναλισκόμενης ισχύος (αθροιστικά και στις τρεις φάσεις), το οποίο πρέπει να ξεπεραστεί για να ξεκινήσει η γεννήτρια ecopower CHP ακόμη και στην περίπτωση καταστάσεων φόρτισης που ορίζονται από την παράμετρο 631_PldLzMin και 632_PldLzMax
634_PConsMax	W	0	10000	3000	Ανώτατο όριο της καταναλισκόμενης ισχύος (αθροιστικά και στις τρεις φάσεις) στο οποίο η γεννήτρια ecopower CHP θα έχει ξεκινήσει σε περίπτωση κατάστασης φόρτισης που ορίζεται από την παράμετρο 632_PldLzMax
635_PChargeMAx	W	0	16000	3000	Ισχύς την οποία θα λαμβάνει ο αντιστροφέας από την γεννήτρια ecopower CHP
636_PDump1	W	0	8000	500	Ισχύς του απορριπτικού φορτίου 1, το οποίο πρέπει να συνδεθεί στο ρελέ K1 του αντιστροφέα, όταν υπάρχει σύνδεση με την γεννήτρια ecopower CHP
637_PDump2	W	0	8000	2000	Ισχύς του απορριπτικού φορτίου 2, το οποίο πρέπει να συνδεθεί στο ρελέ K6 του αντιστροφέα, όταν υπάρχει σύνδεση με την γεννήτρια ecopower CHP
638_PBHKWMin	W	0	4000	2200	Ελάχιστη ισχύς της γεννήτριας ecopower CHP
639_PBHKWMax	W	0	10000	4700	Μέγιστη ισχύς της γεννήτριας ecopower CHP
640_BHKW_Ton	sec	0	10000	300	Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας της γεννήτριας ecopower CHP
641_BHKW_Toff	sec	0	10000	300	Ελάχιστος χρόνος διακοπής της γεννήτριας ecopower CHP
642_BHKW_Tmax	sec	0	20000	0	Μέγιστος χρόνος λειτουργίας της γεννήτριας ecopower CHP σε mode 2
644_PldOnLx	W	0	3300	0	Όριο ισχύος σε μια φάση, υπέρβαση του οποίου εκκινεί την γεννήτρια ecopower CHP

***Πίνακας 4.5* – Στοιχεία ελέγχου για τη σύνδεση του αντιστροφέα sunny island με γεννήτρια ή άλλη πηγή**

Με την ρύθμιση του στοιχείου ελέγχου 602, καθορίζεται το είδος της εξωτερικής πηγής του μικροδικτύου που συνδέεται με τον αντιστροφέα. Επιλέγεται none για την περίπτωση μη ύπαρξης εξωτερικής πηγής, grid-forming η γεννήτρια ρυθμίζει αυτή την τάση και την συχνότητα του δικτύου (οπότε ο αντιστροφέας ακολουθεί αυτές τις τιμές), grid-tied όταν η γεννήτρια ακολουθεί την τάση και την συχνότητα του αντιστροφέα, Mains για την σύνδεση της γεννήτριας με το κεντρικό δίκτυο (χωρίς έλεγχο droops), ενώ με τις επιλογές droop, η συνεργασία είτε με το δίκτυο είτε με την γεννήτρια γίνεται μέσω των καμπυλών στατισμού.

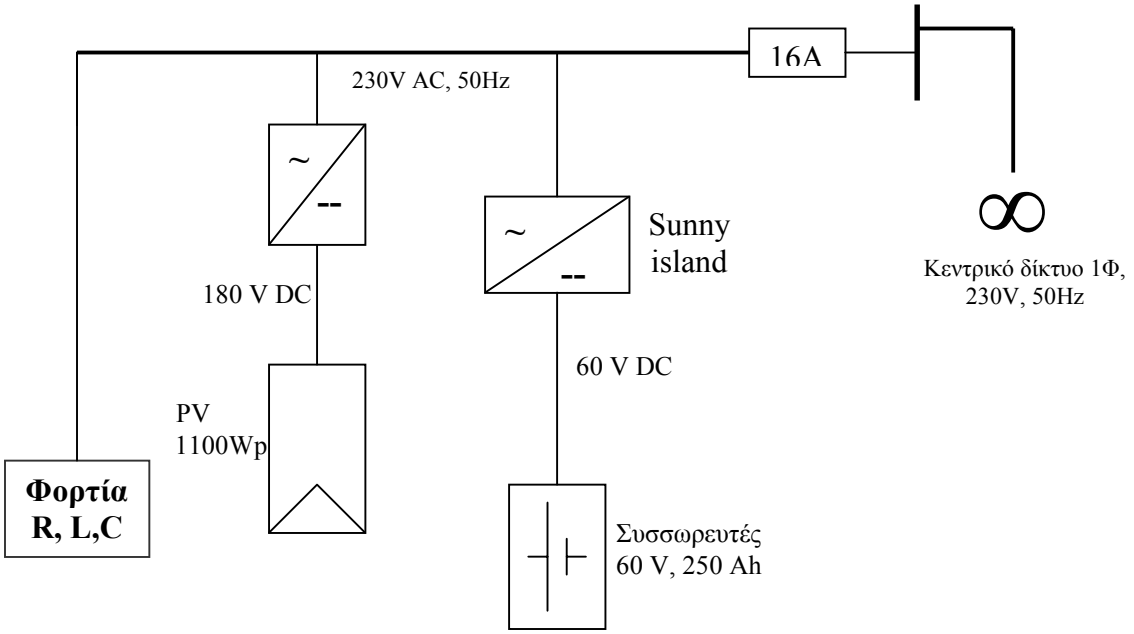
Με το στοιχείο 603, ορίζεται ο τρόπος εκκίνησης της γεννήτριας μέσω του αντιστροφέα.

Ο αντιστροφέας ξεκινά την γεννήτρια είτε ως συνάρτηση του βάθους εκφόρτισης των συσσωρευτών, είτε ως συνάρτηση της ισχύος εξόδου του. Αν για παράδειγμα οι συσσωρευτές βρίσκονται σε μια κατάσταση φόρτισης κάτω από 40%, η γεννήτρια θα πρέπει να ξεκινήσει αμέσως για να φορτισθούν. Εναλλακτικά, για να αποφευχθεί ακόμη και αυτή η βαθιά εκφόρτιση των συσσωρευτών που μειώνει τη διάρκεια ζωής τους, μπορεί να ρυθμιστεί η εκκίνηση της γεννήτριας όταν ο αντιστροφέας εξάγει ένα συγκεκριμένο ποσοστό της κανονικής του ισχύος. Ένα μεγάλο ποσοστό ισχύος εξόδου, είναι ένδειξη ότι υπάρχει μεγάλη κατανάλωση στο μικροδίκτυο, η οποία καλό θα ήταν να καλυφθεί από τη σίγουρη ισχύ της γεννήτριας και όχι από τους συσσωρευτές. Οι ρυθμίσεις αυτές γίνονται με τα στοιχεία ελέγχου 631 και 625 αντίστοιχα.

Ακόμη, η γεννήτρια μπορεί να ξεκινήσει όταν η συνολική ισχύ των φορτίων υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο. Η ρύθμιση αυτή γίνεται με το στοιχείο 633.

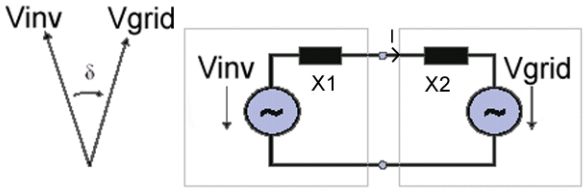
Όλες αυτές οι διαδικασίες συνοδεύονται από μια σειρά ρυθμίσεων, όπως τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να παράγει η γεννήτρια, τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να απορροφήσει ο αντιστροφέας από τη γεννήτρια (στοιχείο ελέγχου 635), καθώς και τους χρόνους προθέρμανσης, λειτουργίας και ψύξης της γεννήτριας. Επίσης ρυθμίζεται και ο χρόνος μέσα στον οποίο η γεννήτρια δεν θα επανεκκινήσει έπειτα από τη διακοπή της λόγω σφάλματος.

4.4 Σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο χαμηλής τάσης (RUN-I ή RUN-U_EXT)



Σχεδιάγραμμα 4.3 – **Διασυνδεδεμένη λειτουργία μικροδικτύου**

Η περίπτωση σύνδεσης του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο, δεν διαφέρει και σε πολλά σημεία με την σύνδεση με μια γεννήτρια.



Εικόνα 4.2 – Ηλεκτρικό ισοδύναμο της σύνδεσης του αντιστροφέα sunny island με το κεντρικό δίκτυο χαμηλής τάσης. Μεσολαβούν οι σύνθετες αντιδράσεις συνδέσεως X1 και X2. Για X1+X2=X προκύπτει η εξίσωση: $\vec{V}inv = \vec{V}grid + j \cdot X \cdot \vec{I}$ **, όπου I το ρεύμα που ρέει μεταξύ αντιστροφέα και δικτύου**

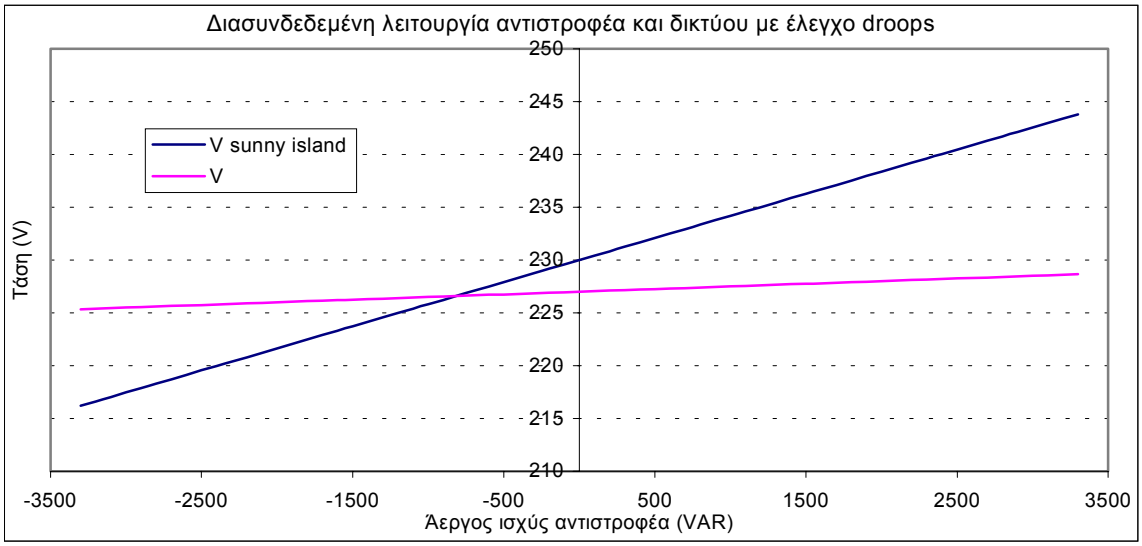
Ένα μεγάλο ηλεκτρικό δίκτυο, μπορεί να απορροφήσει από (ή να παρέχει) ένα αντιστροφέα ή οποιαδήποτε άλλη συγχρονισμένη πηγή ενέργειας τόση ισχύ, όση επιτρέπουν οι ασφάλειες του δικτύου χαμηλής τάσης, και ο μετασχηματιστής που το συνδέει με τη μέση τάση. Πρακτικά η τάση και συχνότητα λειτουργίας καθορίζονται από το δίκτυο (άπειρος ζυγός).

Στην περίπτωση αυτή ο αντιστροφέας μπορεί να λειτουργήσει είτε σε κατάσταση grid-tied (RUN-I), δηλαδή να ακολουθεί την τάση και τη συχνότητα του δικτύου είτε σε παραλληλισμένη λειτουργία με έλεγχο droops (RUN-U_EXT). *Πρακτικά, είναι αδύνατον ένας αντιστροφέας μόλις 3,3KVA να συμβάλει στην ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας ενός γιγάντιου δικτύου, οπότε στην πρώτη περίπτωση απλά ακολουθεί αυτές τις τιμές, ελέγχοντας μόνο το ρεύμα φόρτισης των συσσωρευτών.*

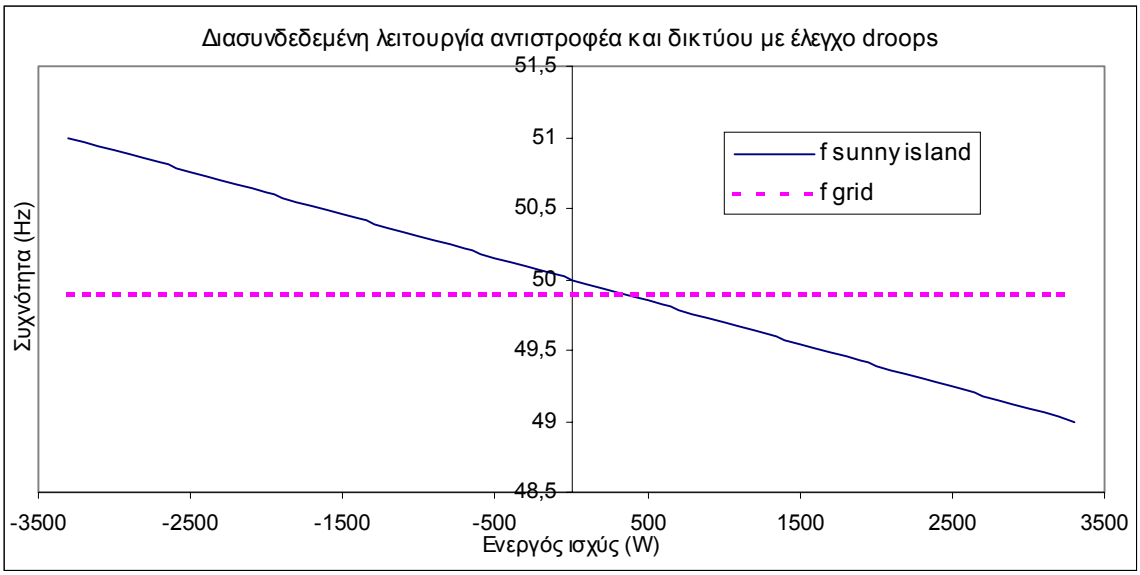
Στην δεύτερη περίπτωση ανταλλάσσει ισχύ σύμφωνα με τις εξισώσεις που προκύπτουν από τις καμπύλες του στατισμού του:

$$P = \frac{(f_0 - f)}{droopf}$$

$$Q = \frac{(V_0 - V)}{droopV}$$



***Εικόνα 4.3* – Παράδειγμα διασυνδεδεμένης λειτουργίας αντιστροφέα και δικτύου. Η κοινή τάση λειτουργίας είναι η τάση του δικτύου όπως μετράται στους ακροδέκτες του αντιστροφέα (V=Vgrid+jXI). Το σημείο τομής της καμπύλης στατισμού της τάσης του αντιστροφέα με την τάση του δικτύου όπως αυτή μετράται στα άκρα του αντιστροφέα (V) καθορίζει την άεργο ισχύ που ανταλλάσσει με αυτό.**



Εικόνα 4.4 – Σε αντίθεση με την τάση ακροδεκτών του αντιστροφέα που διαφέρει από αυτήν του δικτύου λόγω της επαγωγικής αντίδρασης μεταξύ των δύο πηγών (διάνυσμα I*X), η συχνότητα του αντιστροφέα στη διασυνδεδεμένη λειτουργία είναι η συχνότητα του δικτύου. Θεωρώντας αυτήν πρακτικά σταθερή ίση με 49.9Hz για ένα διάστημα, το σημείο τομής με την χαρακτηριστική P-f του sunny island καθορίζει την ισχύ που θα ανταλλαγεί με το δίκτυο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ο αντιστροφέας προσφέρει ενεργό ισχύ στο δίκτυο.

Οι ρυθμίσεις που καθορίζουν την σύνδεση του αντιστροφέα με το κεντρικό δίκτυο ή με γεννήτρια παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Παράμετρος	Unit	min	max	default	περιγραφή
401_Phase Mode		0	16	0	0: 1Phs_Single: μονοφασική λειτουργία 1: Μονοφασική λειτουργία με ένα συσσωρευτή για κάθε συσκευή 2: 1Phs_Mstr2: μονοφασική λειτουργία παράλληλα με άλλο ένα αντιστροφέα αλλά κοινή πηγή συσσωρευτών. Η παρούσα συσκευή είναι πρωτεύουσα. 3: 1Phs_Mstr3: μονοφασική λειτουργία παράλληλα με άλλους δύο αντιστροφείς αλλά με κοινό συσσωρευτή. Αυτός ο αντιστροφέας είναι πρωτεύον. 4: 1Phs_Siv2: μονοφασική λειτουργία παράλληλα με ένα ή δύο αντιστροφείς και κοινό συσσωρευτή. Η παρούσα συσκευή είναι δευτερεύουσα. 5: 1Phs_Siv3: μονοφασική λειτουργία παράλληλα με τρεις αντιστροφείς και κοινό συσσωρευτή. Η παρούσα συσκευή είναι τριτεύουσα. 6: 3Phs_Mstr1Set: τριφασική λειτουργία (ένας αντιστροφέας ανά φάση). Η παρούσα συσκευή είναι πρωτεύουσα. 10: 3Phs_SlvL2: τριφασική λειτουργία. Δευτερεύουσα συσκευή 11: Τριφασική λειτουργία. Τριτεύουσα συσκευή
402_Uconv nom	V	200	260	230	Τάση που ρυθμίζει ο αντιστροφέας στο δίκτυο σε λειτουργία RUN-U.
403_Fconv nom	Hz	40	70	50	Συχνότητα της τάσης που ρυθμίζει ο αντιστροφέας σε λειτουργία RUN-U
404_Uext nom	V	150	260	230	Κανονική τάση του δικτύου στο οποίο συνδέεται ο αντιστροφέας σε λειτουργία RUN-I
405_Uext min	V	150	260	200	Ελάχιστη τιμή της τάσης του δικτύου σε λειτουργία RUN-I
406_Uext max	V	150	260	255	Μέγιστη τιμή της τάσης του δικτύου σε λειτουργία RUN-I
407_Fext nom	Hz	40	70	50	Κανονική τιμή της συχνότητας του δικτύου στο οποίο συνδέεται ο αντιστροφέας σε λειτουργία RUN-I
408_Fext min	Hz	40	70	47	Ελάχιστη τιμή της συχνότητας του δικτύου στο οποίο συνδέεται ο αντιστροφέας σε λειτουργία RUN-I
409_Fext max	Hz	40	70	56	Μέγιστη τιμή της συχνότητας του δικτύου στο οποίο συνδέεται ο αντιστροφέας σε λειτουργία RUN-I
411_Iac chrg mx	A	0	16	10	Μέγιστο ρεύμα το οποίο μπορεί να απορροφήσει ο αντιστροφέας από το δίκτυο για την φόρτιση των συσσωρευτών, σε λειτουργία RUN-I
420 Droopfreq	**Hz/ Pnom**	-5	5	-1	Όταν η συχνότητα του συστήματος διαφέρει από την ονομαστική κατά αυτό το ποσό, ο αντιστροφέας θα δώσει ισχύ ίση με Pnom στο δίκτυο σε λειτουργία RUN-U_EXT
421 DroopVolt	**%/ Qnom**	-25	25	-6	Όταν η τάση του δικτύου διαφέρει από την ονομαστική κατά το ποσοστό αυτό, ο αντιστροφέας θα δώσει άεργο ισχύ Qnom στο δίκτυο σε λειτουργία RUN-U_EXT

Πίνακας 4.6 **– Ρυθμίσεις ελέγχου του αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο**

Η παράμετρος 401 καθορίζει την τοπολογία της διασύνδεσης του αντιστροφέα με την εξωτερική πηγή, είτε σε μονοφασική γραμμή είτε σε τριφασική.

Οι παράμετροι 402 και 403 χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της ονομαστικής τάσης και της συχνότητας που θα παρέχει ο αντιστροφέας στο μικροδίκτυο, όταν αυτός συνδέεται με άλλες γεννήτριες σε λειτουργία RUN-U.

Αντίθετα, όταν πρόκειται για λειτουργία πρόσδεσης στο δίκτυο (RUN-I), τότε οι τιμές τάσης και συχνότητας του δικτύου καθορίζονται με τις παραμέτρους 404,407.

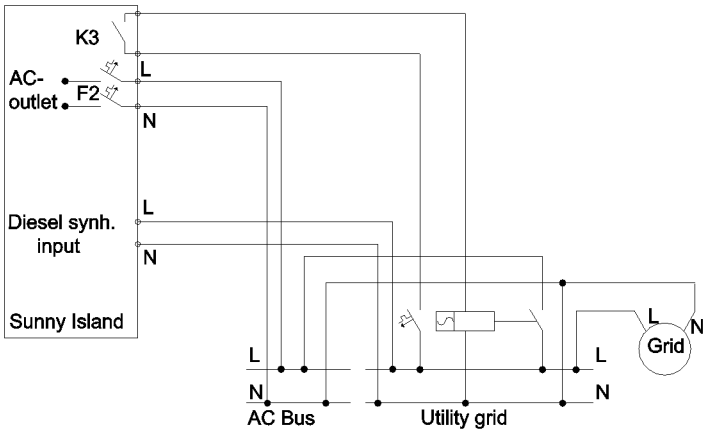
Σ' αυτήν την περίπτωση πρέπει να καθοριστούν και τα όρια των μεγεθών αυτών. Κάτι τέτοιο είναι προφανές, διότι η τάση και η συχνότητα σε οποιοδήποτε δίκτυο, είτε είναι μεγάλο είτε μικρό, μπορούν να μεταβληθούν εξαιτίας μιας σειράς παραγόντων. Επιθυμητό είναι όταν τα μεγέθη αυτά ξεπεράσουν κάποια όρια, να προκαλέσουν αποσύνδεση του αντιστροφέα είτε για την προστασία των φορτίων είτε για την προστασία του ίδιου του αντιστροφέα. Τα όρια αυτά ρυθμίζονται με τις παραμέτρους 405,406,408,409.

Μετά την αναβάθμιση του αντιστροφέα sunny island, προστέθηκαν τα στοιχεία ελέγχου 420, 421 με τα οποία γίνεται η ρύθμιση των κλίσεων των χαρακτηριστικών στατισμού P-f, Q-V.

Τέλος με το στοιχείο ελέγχου 411, ρυθμίζεται το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να απορροφήσει ο αντιστροφέας από το δίκτυο για να φορτίσει τους συσσωρευτές.

Ενώ για την περίπτωση μιας διασυνδεδεμένης γεννήτριας, την τάση και την συχνότητα του μικροδικτύου μπορούν να την ελέγχουν είτε ο αντιστροφέας είτε η γεννήτρια, στην περίπτωση της διασυνδεδεμένης λειτουργίας με δίκτυο χαμηλής τάσης ο έλεγχος αυτός δεν είναι δυνατός από τον αντιστροφέα. Συνεπώς όταν ο αντιστροφέας βρίσκεται σε λειτουργία τροφοδότησης του απομονωμένου μικροδικτύου (grid-U) και πρόκειται να διασυνδεθεί με το κεντρικό δίκτυο, θα πρέπει να αλλάξει την λειτουργία του από grid-forming (RUN-U) σε grid-tied (RUN-I).

Η μετάβαση αυτή γίνεται μέσω των αυτόματων διακοπτών που διαθέτει ο αντιστροφέας. Ένα από αυτά καθορίζεται για τον έλεγχο της διασύνδεσης της γραμμής που συνδέει τον αντιστροφέα με το δίκτυο χαμηλής τάσης.



***Εικόνα 4.5* – Συνδεσμολογία του εργαστηριακού μικροδικτύου πριν την αναβάθμισή του. Επιτρέπει την μετάβαση από κατάσταση πρόσδεσης σε κατάσταση τροφοδότησης (RUN-I σε RUN-U) είτε χειροκίνητα, είτε αυτόματα μετά από διακοπή της τάσης του δικτύου με χρόνο μεταγωγής σε χρόνο μέχρι 2 δευτερολέπτων.**

Ο αντιστροφέας, ακόμη κι αν λειτουργεί απομονωμένα, τροφοδοτώντας αυτός το μικροδίκτυο, έχει ξεχωριστή γραμμή για την μέτρηση της τάσης και της συχνότητας του δικτύου (ή μιας γεννήτριας). Προκειμένου η διασύνδεση με το δίκτυο χαμηλής τάσης να γίνει ομαλά, δηλαδή να μην παρουσιάζεται διαφορά φάσης μεταξύ των κυματομορφών των τάσεων του αντιστροφέα και του δικτύου χαμηλής τάσης, ο αντιστροφέας πρέπει να ολισθήσει κατάλληλα την φάση της τάσης που παράγει ώστε να συμπέσει με αυτήν του δικτύου.

Κάτι τέτοιο πρακτικά δεν μπορεί να γίνει ακαριαία, μεσολαβεί ένας χρόνος της τάξεως των λίγων κύκλων του δευτερολέπτου (50 κύκλοι=1 sec). Το χρονικό αυτό διάστημα που μεσολαβεί είναι κρίσιμο για την αδιάλειπτη τροφοδότηση των καταναλώσεων του μικροδικτύου, καθώς οι ηλεκτρικές συσκευές δεν έχουν σταθερά όρια ανοχών στις διακοπές. Μια ηλεκτρική θερμάστρα για παράδειγμα δεν πρόκειται να επηρεαστεί καθόλου, ωστόσο μια ευαίσθητη ηλεκτρονική συσκευή όπως ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής μπορεί να σταματήσει να λειτουργεί.

Αυτή η τοπολογία διασύνδεσης επιτρέπει και την λειτουργία του αντιστροφέα ως αδιάλειπτου παροχέα ισχύος (UPS). Οι καταναλώσεις του μικροδικτύου στο οποίο βρίσκεται τροφοδοτούνται πάντοτε από το κεντρικό δίκτυο ενώ ο αντιστροφέας παίρνει ισχύ για να φροντίζει για την καλή φόρτιση των συσσωρευτών, χωρίς να τους εκφορτίζει ποτέ. Οι λειτουργίες αυτές περιλαμβάνουν την φόρτιση συντήρησης (float charge) και την φόρτιση βελτιστοποίησης (equalizing charge).

Σε περίπτωση διακοπής της τάσης στο κεντρικό δίκτυο, ο αντιστροφέας διακόπτει τη σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο (κατάσταση RUN-I), μεταβαίνει σε κατάσταση RUN-U και τροφοδοτεί αμέσως αυτός τις καταναλώσεις του μικροδικτύου. Δεδομένης της ικανότητας

των συσσωρευτών να παρέχουν ισχύ άμεσα, η ταχύτητα ανταπόκρισης του αντιστροφέα για τη μετάβαση αυτή εξαρτάται από το ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου του. (Μετά την αναβάθμιση μέρους του ηλεκτρονικού κυκλώματος του αντιστροφέα, η μετάβαση γίνεται χωρίς καμία διακοπή). Όταν η τάση στο δίκτυο επανέλθει ο αντιστροφέας ανιχνεύοντας αυτήν, θα μεταβεί από κατάσταση τροφοδότησης σε κατάσταση πρόσδεσης (RUN-I), αφήνοντας πλέον το δίκτυο να τροφοδοτεί τις καταναλώσεις. Η μετάβαση αυτή είναι πιο γρήγορη απ' ότι η μετάβαση από RUN-I σε RUN-U, δεδομένου του απρόβλεπτου γεγονότος στην τελευταία περίπτωση.

Η λειτουργία αυτή είναι πολύ βασική για την ευρεία εφαρμογή των μικροδικτύων. Ένα μικροδίκτυο δεν είναι απαραίτητο να λειτουργεί εκεί δεν φτάνει το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, αλλά και σε σημεία που υπάρχει. Στο μικροδίκτυο αυτό μπορούν να λειτουργούν μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είτε μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας ικανοποιώντας τις ανάγκες σε θέρμανση της τοπικής κοινωνίας. Η ενέργεια που παράγεται παρέχεται στο κεντρικό δίκτυο και μοιράζεται βέβαια στις καταναλώσεις. Η ύπαρξη ενός αντιστροφέα συσσωρευτών κάνει εφικτή την δημιουργία μονάδων εφεδρείας και αδράνειας ώστε η τροφοδότηση των καταναλώσεων του μικροδικτύου να είναι δυνατή ακόμη κι αν υπάρξει κατάρρευση του κεντρικού δικτύου.

Υπάρχει ακόμη η περίπτωση να είναι δυνατή η διασύνδεση με το δίκτυο αλλά να μην είναι επιθυμητή η συνεχής διασύνδεση με αυτό. Σε μια τέτοια εφαρμογή ο αντιστροφέας sunny island ελέγχει την τάση, την συχνότητα φορτίζοντας ή εκφορτίζοντας τους συσσωρευτές. Αν δεν είναι διαθέσιμες εφεδρικές γεννήτριες για την κάλυψη της φόρτισης των συσσωρευτών ή των αιχμών του μικροδικτύου, τον ρόλο αυτό μπορεί να αναλάβει το κεντρικό δίκτυο. Ο αντιστροφέας διαπιστώνοντας μια κατάσταση χαμηλής φόρτισης των συσσωρευτών ή μεγάλη κατανάλωση, μπορεί να ενεργοποιήσει την διασύνδεση με το δίκτυο ώστε καλυφθούν αυτές οι απαιτήσεις. Ο έλεγχος αυτός γίνεται σύμφωνα με όσα περιγράφτηκαν στην ενότητα που εξετάστηκε η διασύνδεση του αντιστροφέα με την εφεδρική γεννήτρια, με τη μόνη διαφορά ότι στη θέση της εφεδρικής γεννήτριας υπάρχει το κεντρικό δίκτυο.

4.5 Αναβάθμιση των στοιχείων ελέγχου του αντιστροφέα sunny island

Η αναβάθμιση του μικροεπεξεργαστή ελέγχου του αντιστροφέα sunny island, προσέθεσε τα στοιχεία ελέγχου 420, 421, 426 (και προσθήκες σε λοιπά στοιχεία όπως το 602) ώστε να γίνεται από αυτά άμεσα η ρύθμιση των καμπύλων στατισμού P-f, Q-V. Η λειτουργία αυτή, η οποία έχει ενσωματωθεί στα νεότερα μοντέλα αντιστροφέων ισχύος sunny island 4500 και αποκαλείται **RUN-U_UEXT**, είναι ιδιαίτερα ευέλικτη στην περίπτωση ύπαρξης περισσότερων του ενός αντιστροφέων στην ίδια φάση. Ένα όριο ασφαλείας έως και τεσσάρων ίδιων αντιστροφέων ανά φάση προτείνεται από τους κατασκευαστές για την σταθερότητα και την ασφάλεια αυτής της λειτουργίας. Ο κάθε αντιστροφέας συμπεριφέρεται όπως μια σύγχρονη γεννήτρια του ηλεκτρικού δικτύου, συνεισφέροντας ενεργό και άεργο ισχύ ανάλογα με την τιμή της τάσης και της συχνότητας του δικτύου. Δεν υπάρχει μια κεντρική μονάδα ελέγχου της συχνότητας και της τάσης, καθώς όλες συνεισφέρουν κατά κάποιο ποσοστό. Οι καμπύλες αυτές μπορεί να ρυθμιστούν με διαφορετική κλίση για τον κάθε αντιστροφέα, ώστε να είναι ελεγχόμενο το ποσοστό «συνεισφοράς» ισχύος του καθενός στο δίκτυο.

Έτσι με το στοιχείο ελέγχου 420 (Droopf) ρυθμίζεται η κλίση της καμπύλης της συχνότητας ως ποσοστό 1 $Hz/P_{nomimal}$. Όταν δηλαδή η συχνότητα στο δίκτυο διαφέρει κατά την τιμή αυτή, τότε ο αντιστροφέας θα προσφέρει ισχύ ίση με την ονομαστική του στο δί-

κτυο (σε διασυνδεδεμένη λειτουργία). Αντίστροφα, θα αποκλίνει κατά την τιμή αυτή, όταν προσφέρει ενεργό ισχύ ίση με την ονομαστική, σε απομονωμένη λειτουργία.

Με τις προκαθορισμένες τιμές droopf=-1Hz/Pnom, εάν η συχνότητα του δικτύου είναι μικρότερη κατά 1 Hz από την fconv (ονομαστική) του αντιστροφέα, ο τελευταίος θα παρέχει ενεργό ισχύ ίση με την ονομαστική του (3,3KW) στο δίκτυο. Θα απορροφήσει ισχύ 3,3KW, όταν η συχνότητα του δικτύου είναι μεγαλύτερη κατά 1Hz από την ονομαστική του αντιστροφέα.

Η θεωρητική κλίση που καθορίζει την ευθεία του στατισμού της συχνότητας είναι λοιπόν:

$$f = f_0 - (droopf / P_{nom}) \cdot P,$$

όπου:

- f_0, η ονομαστική συχνότητα του αντιστροφέα (Hz) για μηδενική ισχύ εξόδου [fconv_nom, στοιχείο ελέγχου 403]
- P_0, η ονομαστική ενεργός ισχύς του αντιστροφέα (W)
- P, η ισχύς εξόδου του αντιστροφέα (W)
- *f,* η συχνότητα του αντιστροφέα (Hz) για ισχύ εξόδου P
- *droopf*, η τιμή της κλίσης που καθορίζεται στον αντιστροφέα

Το στοιχείο ελέγχου 421 (DroopV) καθορίζει την κλίση της καμπύλης Q-V, ως ποσοστό απόκλισης % από την ονομαστική τάση V_{nom} ανά Q_{nom} ($\Delta V/\Delta Q$). Αυτό σημαίνει ότι σε διασυνδεδεμένη με το δίκτυο λειτουργία, όταν η τάση εξόδου του αντιστροφέα V διαφέρει από την ονομαστική του αντιστροφέα κατά το ποσοστό αυτό, τότε ο αντιστροφέας θα δώσει άεργο ισχύ ίση με την ονομαστική του στο δίκτυο. Σε απομονωμένη λειτουργία η τάση θα αποκλίνει από την ονομαστική τιμή κατά το ποσοστό αυτό όταν προσφέρει άεργο ισχύ ίση με την ονομαστική. Έτσι η εξίσωση της τάσης συναρτήσει της αέργου ισχύος διαμορφώνεται ως εξής:

$$V = V_0 - (droopV\% / Qnom) \cdot Q \quad \text{ή}$$

$$V = V_0 - (\frac{droopV}{100} \cdot Vnom / Qnom) \cdot Q$$

όπου:

- V_0, η ονομαστική τάση του αντιστροφέα για μηδενική ισχύ εξόδου [Uconv_nom, στοιχείο ελέγχου 402]
- Q_{nom}, η ονομαστική άεργος ισχύς του αντιστροφέα
- Q, η άεργος ισχύς εξόδου
- V, η τάση του αντιστροφέα
- droopV, η τιμή της κλίσης που καθορίζεται στον αντιστροφέα (ποσοστό %).

Συνοπτικά λοιπόν, όλη η ροή ισχύος μεταξύ αντιστροφέα και δικτύου καθορίζεται από τις τέσσερις μεταβλητές: V_0, f_0, droopf, droopV. Τα μεγέθη αυτά προκύπτουν με επίλυση των εξισώσεων των χαρακτηριστικών droops, ως προς P και Q αντίστοιχα:

$$P = \frac{(f_0 - f) \cdot Pnom}{droopf}$$

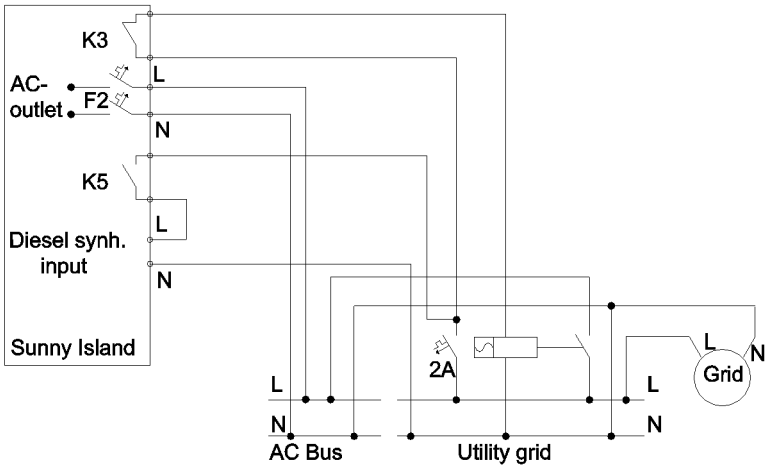
$$Q = \frac{(V_0 - V) \cdot Qnom}{droopV\%}$$

όπου f η συχνότητα κεντρικού δικτύου την εκάστοτε χρονική στιγμή και V τάση του αντιστροφέα, η οποία προκύπτει από την τάση του δικτύου αν ληφθεί υπ' όψιν η σύνθετη αντίδραση που μεσολαβεί μεταξύ των δύο πηγών: $\vec{V} = \vec{V}grid + j \cdot X \cdot \vec{I}$

Για την λειτουργία με βάση την κλίση των καμπυλών στατισμού, έχουν προστεθεί επίσης στην υπόρριζα PARGEN 602 τα στοιχεία ελέγχου:

- DroopMains (συνεργασία μέσω droops με το κεντρικό δίκτυο)
- DroopGen (συνεργασία μέσω droops με γεννήτρια που διαθέτει στατισμό)
- DroopGenMains (συνεργασία μέσω droops και με δίκτυο και με γεννήτρια)

τα οποία και καθορίζουν το είδος της σύνδεσης του αντιστροφέα με την εξωτερική πηγή. Το στοιχείο **DroopGenMains** να είναι η ρύθμιση που επιτρέπει την χειροκίνητη ρύθμιση της ζεύξης – απόζευξης από το δίκτυο χωρίς διακοπή (default τιμή) και υλοποιεί την συνδεσμολογία του εργαστηρίου.



***Εικόνα 4.6* - Συνδεσμολογία εργαστηριακού μικροδικτύου μετά την αναβάθμισή του για λειτουργία μόνο σε κατάσταση droop mode, δηλαδή ελέγχου της τάσης και της συχνότητας μέσω των κλίσεων στατισμού. Ο αντιστροφέας μεταβαίνει από κατάσταση τροφοδότησης (RUN-U) σε κατάσταση τροφοδότησης με έλεγχο droop σε κατάσταση τροφοδότησης με εξωτερική πηγή (RUN-U_EXT) και αντίστροφα, μόνο χειροκίνητα μέσω του ρελέ ελέγχου K5. Διακοπή της τάσης του δικτύου, δεν προκαλεί αυτόματη μετάβαση σε λειτουργία RUN-U στον αντιστροφέα, αλλά διακοπή της λειτουργίας του αντιστροφέα. Η μετάβαση από τη μια κατάσταση στην άλλη γίνεται χωρίς διακοπή.**

Στην συνδεσμολογία που έχει πραγματοποιηθεί στο μικροδίκτυο του εργαστηρίου, δεν είναι εφικτή η αυτόματη μετάβαση του αντιστροφέα όταν υπάρχει κατάρρευση του δικτύου. Κάτι τέτοιο είναι δυνατόν μόνο μέσω εντολών στο κύκλωμα ελέγχου του αντιστροφέα. Ωστόσο η μετάβαση από τη μη διασυνδεδεμένη λειτουργία σε διασυνδεδεμένη, η οποία γίνεται με τον έλεγχο του ρελέ K3 από το ρελέ K5, πραγματοποιείται χωρίς καμία διακοπή. Έτσι η κατάσταση του ρελέ K3 είναι πάντα AUTO, ενώ με το ρελέ K5 δίνεται η εντολή ελέγχου για σύνδεση ή αποσύνδεση με το δίκτυο. Σε θέση OFF, το μικροδίκτυο λειτουργεί απομονωμένα από το κεντρικό δίκτυο (RUN_U mode), ενώ σε θέση ON διασυνδέ-

εται (RUN_U_EXT mode), πάντα χωρίς διακοπή. *Να διευκρινιστεί και πάλι ότι μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα μεταξύ της στιγμής που δίνεται η εντολή στον αντιστροφέα (από την οθόνη ελέγχου ή μέσω software) και της στιγμής που κλείνει ο διακόπτης K3 και συνδέει τις δύο πηγές. Ο χρόνος αυτός είναι ο απαιτούμενος για να λειτουργήσει ο βρόχος κλειδώματος φάσης ώστε να μηδενίσει τη διαφορά φάσης μεταξύ της κυματομορφής του αντιστροφέα και του δικτύου (ολίσθηση συχνότητας). Έτσι λοιπόν, η σύνδεση (ή αποσύνδεση) σε κάθε περίπτωση γίνεται χωρίς διακοπή στο ρεύμα.*

Ενώ όμως η παραπάνω λειτουργία του αντιστροφέα σε κατάσταση ελέγχου με βάση τις καμπύλες droop, εξυπηρετεί ιδιαίτερα στην παραλληλισμένη λειτουργία πολλών αντιστροφέων στην ίδια φάση ενός απομονωμένου μικροδικτύου, δεν φαίνεται να είναι το ίδιο εξυπηρετική όταν η σύνδεση γίνεται με το κεντρικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, το κεντρικό δίκτυο είναι αυτό που σίγουρα επιβάλλει την τάση και την συχνότητα του όλου συστήματος, συνεπώς και ελέγχει ουσιαστικά κάθε στιγμή την ροή ενεργού και αέργου ισχύος. Αν για παράδειγμα το κεντρικό δίκτυο λειτουργεί επί μακρόν σε συχνότητα 49,9 Hz, με βάση μια αρνητική κλίση της καμπύλης συχνότητας-ενεργού ισχύος και καθορισμένη ονομαστική συχνότητα f_0=50Hz, ο αντιστροφέας θα έδινε συνεχώς ενεργό ισχύ στο δίκτυο, εκφορτίζοντας έτσι τους συσσωρευτές. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και με θετική κλίση του στατισμού ενώ η συχνότητα στο δίκτυο βρίσκεται επί μακρόν πάνω από τα 50 Hz.

Σε αυτές τις περιπτώσεις ο αντιστροφέας, αποκλίνει από τον έλεγχο μέσω droops προκειμένου να φορτίσει τους συσσωρευτές σύμφωνα με τα όσα έχουν αναφερθεί στο σχετικό κεφάλαιο (πλήρη και βελτιστοποιητική φόρτιση).

Τέλος, με το στοιχείο ελέγχου **426_RevCurrent** ορίζεται το μέγιστο ρεύμα (μέχρι 200A) που μπορεί να εισάγεται συνολικά στο δίκτυο ή την γεννήτρια με την οποία διασυνδέονται ένας ή περισσότεροι αντιστροφείς sunny island. Ροή ρεύματος μεγαλύτερη από την καθορισμένη τιμή, ερμηνεύεται ως σφάλμα στο δίκτυο ή την γεννήτρια, οπότε γίνεται αυτόματα αποσύνδεση των αντιστροφέων με αυτές τις εξωτερικές πηγές, για να αποφευχθεί περαιτέρω σφάλμα στο τοπικό δίκτυο, το οποίο θα μεταβεί σε απομονωμένη λειτουργία (η ρύθμιση αυτή λειτουργεί μόνο σε κατάσταση DroopMains ή DroopMainsForm).

4.6 Έλεγχος ισχύος αντιστροφέα φωτοβολταϊκών

Σε ένα απομονωμένο μικροδίκτυο που έχει μοναδική πηγή τα φωτοβολταϊκά είναι πιθανόν η παραγόμενη από αυτά ενέργεια να υπερκαλύπτει την καταναλισκόμενη. Στην περίπτωση αυτή, η πλεονάζουσα ενέργεια αποθηκεύεται στους συσσωρευτές μέχρι να φορτισθούν πλήρως. Για την αποφυγή της υπερφόρτισης ο αντιστροφέας είναι δυνατόν να ενεργοποιήσει καταναλωτικά φορτία που θα απορροφήσουν την πλεονάζουσα ενέργεια. Εκτός από αυτή τη μέθοδο, ο αντιστροφέας sunny island μπορεί να ελέγξει την ισχύ εξόδου του αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών μέσω της συχνότητας, αν ο τελευταίος διαθέτει το κατάλληλο firmware. Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν πιο πάνω, απορροφώντας ο αντιστροφέας ενεργό ισχύ με βάση μια αρνητική κλίση droopf, θα αυξάνει τη συχνότητά του αναλογικά με την τιμή $\Delta f/\Delta P$ που έχει οριστεί. Μετρώντας αύξηση της συχνότητας πέρα της ονομαστικής ο αντιστροφέας των φωτοβολταϊκών μειώνει την ισχύ εξόδου του κατά ένα ποσοστό. Πρόκειται δηλαδή για την ενεργοποίηση μιας αρνητικής κλίσης P_{PV}/f, ούτως ώστε ο αντιστροφέας να μειώνει την ισχύ εξόδου του αυξανομένης της συχνότητας. Ο έλεγχος αυτός που ρυθμίζεται με το στοιχείο 801_Sunny Boys, δεν είναι ενεργοποιημένος στο μικροδίκτυο του εργαστηρίου.

παράμετρος	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	default	περιγραφή
801_Sunny boys	0	3	0	0:not installed, ο αντιστροφέας δεν ελέγχει τους αντιστροφείς sunny boy 1:installed, ο αντιστροφέας ελέγχει άμεσα τους αντιστροφείς 2: Inst. Mains: ο αντιστροφέας ελέγχει την ισχύ των sunny boy, μόνο σε περίπτωση απομονωμένης από το δίκτυο λειτουργίας 3: Ο αντιστροφέας ελέγχει τους αντιστροφείς sunny boy μέσω αρνητικής κλίσης f/P

4.7 Τριφασική λειτουργία του αντιστροφέα

Ο αντιστροφέας sunny island παράγει μονοφασική τάση σε συχνότητα 230V/50Hz. Ωστόσο είναι δυνατή η κατασκευή ενός τριφασικού μικροδικτύου με την κατάλληλη σύνδεση τριών αντιστροφέων. Σε μια τέτοια κατασκευή, αντίθετα από την περίπτωση παραλληλισμένων στην ίδια φάση αντιστροφέων όπου είναι απαραίτητο ο κάθε ένας να έχει τους δικούς του συσσωρευτές, αυτοί μπορούν να είναι κοινοί για όλους τους αντιστροφείς των διαφορετικών φάσεων.

Στην περίπτωση του τριφασικού δικτύου, πέρα από τα μεγέθη που πρέπει να ελέγχονται και να ρυθμίζονται όπως στη μονοφασική, είναι βασική η ρύθμιση της συμμετρίας της τάσης, δηλαδή της διαδοχικής διαφοράς φάσης κατά 120^0, μεταξύ των τριών τάσεων. Ο κάθε αντιστροφέας τροφοδοτεί από μια φάση ενώ και οι τρεις επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω θύρας RS485, ώστε να εξασφαλίζεται η συμμετρία των φάσεων. Ο ένας αντιστροφέας ορίζεται ως βασικός (master), ενώ οι άλλοι δύο ως βοηθητικοί (slaves).

4.8 Ένταξη ανεμογεννήτριας ή άλλης γεννήτριας στο μικροδίκτυο

Η ένταξη μιας επιπλέον μονάδας στο μικροδίκτυο μπορεί να γίνει πολύ εύκολα απ' ευθείας στον κοινό ζυγό που συνδέονται τα φορτία, οι δύο αντιστροφείς και το δίκτυο, μέσω πάντα των κατάλληλων προστασιών.

Ο πιο διαδεδομένος τύπος ανεμογεννητριών που χρησιμοποιείται σε μικρά αυτόνομα δίκτυα (οικιακών εγκαταστάσεων) ή διασυνδεδεμένων με το δίκτυο, είναι οι Α/Γ συνεχούς ρεύματος. Οι γεννήτριες αυτές είτε παράγουν χαμηλή DC τάση, οπότε φορτίζουν συνήθως συσσωρευτές, είτε παράγουν DC τάση 100-300 volt, οπότε μέσω αντιστροφέα συνδέονται στο μικροδίκτυο ή απ' ευθείας στο κεντρικό δίκτυο.

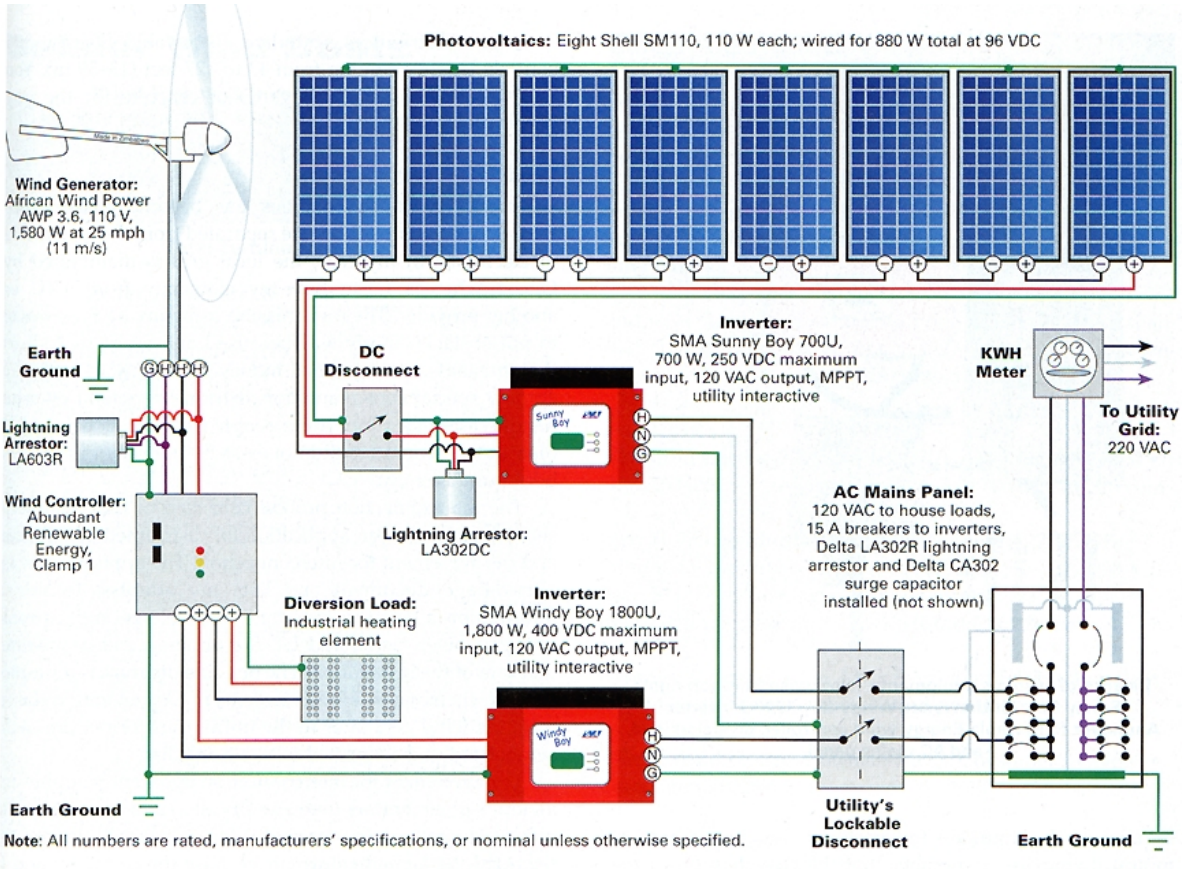
Στην περίπτωση ύπαρξης αντιστροφέα για την μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη της αυτής του δικτύου, υπάρχει μια βασική διαφοροποίηση με τους αντιστροφείς για φωτοβολταϊκά. Ενώ οι τελευταίοι, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως έχουν κύκλωμα ελέγχου της εισερχόμενης ισχύος ώστε να ανιχνεύουν την καμπύλη μέγιστης ισχύος των φωτοβολταϊκών, στους αντιστροφείς των ανεμογεννητριών, αυτό που πρέπει να ελέγχεται είναι η καμπύλη ισχύος συναρτήσει του ανέμου. Για κάθε συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου η ανεμογεννήτρια συνεχούς ρεύματος μπορεί να κινείται με διαφορετικό αριθμό στροφών ώστε να μεγιστοποιεί την ισχύ εξόδου της.

Ευνόητο είναι ότι η ύπαρξη μίας ή περισσοτέρων ανεμογεννητριών προϋποθέτει ένα όσο το δυνατόν ισχυρότερο δίκτυο, ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα της τάσης. Ο μη ελεγχόμενος ρυθμός παραγωγής ενέργειας από την ανεμογεννήτρια (λόγω των γρήγορων μεταβολών του ανέμου), πρέπει να εξομαλύνεται από αντιστροφείς ή συστήματα ελέγχου

γεννητριών καλύπτοντας συνεχώς το ισοζύγιο της ισχύος. Στο μικροδίκτυο του εργαστηρίου, τον ρόλο αυτό αναλαμβάνει ο αντιστροφέας sunny island, καθώς διαθέτει ταχύτατα αποκρινόμενα συστήματα ελέγχου των ηλεκτρονικών ισχύος, οπότε και ρυθμίζει την τάση και την συχνότητα, όταν πρόκειται για αυτόνομη λειτουργία. Όταν αντίθετα υπάρχει διασύνδεση με το δίκτυο ή άλλη ρυθμίζουσα γεννήτρια, τότε αυτά είναι που καθορίζουν την τάση και την συχνότητα.

Στην περίπτωση της αυτόνομης λειτουργίας του μικροδικτύου, ο αντιστροφέας sunny island είναι δυνατόν να ελέγξει την ροή ισχύος από τον αντιστροφέα της ανεμογεννήτριας μέσω της συχνότητας. Ενδεχομένου της πλήρους φόρτισης των συσσωρευτών και μη ύπαρξης απορριπτικών φορτίων, ο αντιστροφέας sunny island θα αυξήσει τη συχνότητα έτσι ώστε ο αντιστροφέας της ανεμογεννήτριας να φτάσει στα όρια λειτουργίας μέσα στα οποία είναι ρυθμισμένος να λειτουργεί ώστε να βγει εκτός. Φυσικά διακοπή του φορτίου της ανεμογεννήτριας σε δυνατούς ανέμους θα μπορούσε να επιταχύνει πολύ αυτήν με συνέπεια την καταστροφή της, γι' αυτό ανάλογα κυκλώματα ελέγχου υπάρχουν πάντα μεταξύ ανεμογεννήτριας και αντιστροφέα της ανεμογεννήτριας μαζί με μεγάλα απορριπτικά φορτία.

Ακριβώς λόγω του μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής ισχύος από μια ανεμογεννήτρια, η σύνδεση μέσω αντιστροφέα με ένα δίκτυο είναι πολύ πιο αποδοτική και συμφέρουσα λύση απ' ότι η σύνδεση ρυθμιστή για την φόρτιση συσσωρευτών.



Εικόνα 4.7 **- Παράδειγμα οικιακής εγκατάστασης συστήματος ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκών, διασυνδεδεμένου με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο χαμηλής τάσης. Περιλαμβάνει κυκλώματα προστασίας από τις κεραυνικές υπερτάσεις, συσκευή ελέγχου της ανεμογεννήτριας, απορριπτικά θερμαντικά φορτία, αντιστροφείς DC/AC για σύνδεση με το δίκτυο, κεντρικό πίνακα διακοπτών σε σειρά με συσκευή προστασίας από τις υπερτάσεις του κεντρικού δικτύου, και μετρητή KWh για την μέτρηση της αποδιδόμενης ενέργειας.**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ, ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

5.1 Γενικές παρατηρήσεις για την καταγραφή της λειτουργίας

Όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια ήταν σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά και την περιγραφή των δυνατοτήτων του υπό μελέτη μικροδικτύου. Αυτό που έχει τη μεγαλύτερη σημασία όμως είναι η συμπεριφορά του σε πραγματικές συνθήκες. Για την μελέτη της συμπεριφοράς του απαιτούνται μια σειρά μετρήσεων κατά την απομονωμένη λειτουργία καθώς και σε διασύνδεση αυτού με το δίκτυο. Ιδιαίτερη βαρύτητα πρέπει να δοθεί στην συμπεριφορά του μικροδικτύου στις μεταβατικές καταστάσεις, στα σφάλματα, στα έντονα επαγωγικά ή χωρητικά φορτία και στη μελέτη της ποιότητας της τάσης.

Για την εξέταση αυτών των στοιχείων θα χρησιμοποιηθούν μετρήσεις που πάρθηκαν στο παρελθόν στο μικροδίκτυο καθώς και μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την τρέχουσα εργασία.

5.1.1 Ποιότητα της τάσης στα δίκτυα χαμηλής τάσης

Ως ποιότητα της τάσης μπορεί να οριστούν τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής ισχύος σε ένα συγκεκριμένο σημείο του δικτύου, έχοντας ως βάση ένα συγκεκριμένο σύνολο μεγεθών αναφοράς. Η μέτρηση της ποιότητας της τάσης περιλαμβάνει την αξιολόγηση βασικών μεγεθών της τάσης αλλά και ορισμένα μεταβατικά φαινόμενα. Τα βασικότερα μεγέθη που συνήθως χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση είναι:

- η διακύμανση της τάσεως
- η διακύμανση της συχνότητας
- η κυματομορφή της τάσης
- η συμμετρία των φάσεων (αν πρόκειται για τριφασικό σύστημα)

Οι διαταραχές της τάσεως μπορούν να χαρακτηριστούν με τη σειρά τους σε αργές και γρήγορες. Μέχρι πριν από λίγα χρόνια ως επιτρεπτά όρια για τα δίκτυα χαμηλής τάσης των 230/400 V, τόσο για τις αργές όσο και για τις γρήγορες μεταβολές είχε οριστεί το όριο των +-10%. Το όριο αυτό αντιστοιχεί σε μεταβολή –6%,+15% για το δίκτυο των 220/380V.

Επίσης ορίζεται και το τρεμόπαιγμα (flicker), ως η αίσθηση που προκύπτει στο ανθρώπινο μάτι από τις συνεχείς μεταβολές της τάσεως και της συχνότητας. Τα μέχρι πρότινος όρια διαμορφώνοντας ως εξής:

- όριο $\pm 3\%$ για συχνότητα 0,01 Hz
- όριο $\pm 1{,}6\%$ για συχνότητα 0,1 Hz
- όριο $\pm 0{,}8\%$ για συχνότητα 1 Hz
- όριο $\pm 0{,}45\%$ για συχνότητα 10 Hz

Για μια πιο ολοκληρωμένη θεώρηση της ποιότητας της ισχύος, λαμβάνοντας υπ' όψιν και το στατιστικό χαρακτήρα της τάσεως θεσπίστηκε το πρότυπο EN50160 (1994,1999), σύμφωνα με το οποίο τα μετρούμενα μεγέθη δεν μετρούνται με βάση κάποια όρια απλά, αλλά βάσει και χρονικών ορίων. Για μια σειρά χαρακτηριστικών της ισχύος, όπως το πλάτος και η συχνότητα της τάσεως, το πλάτος των αρμονικών και των ενδοαρμονικών τάσεων, το πλάτος των σημάτων σηματοδοσίας και του τρεμοπαίγματος ορίζονται στατιστικά μεγέθη τα οποία και πρέπει να πληρούνται από τα ηλεκτρικά δίκτυα.

Ιδιαίτερη βαρύτητα βεβαίως πρέπει να δοθεί στην απομονωμένη λειτουργία του μικροδικτύου, καθώς αυτή είναι η δυσμενέστερη περίπτωση λειτουργίας, με τον αντιστροφέα sunny island να πρέπει να ρυθμίσει τάση και συχνότητα, ανταποκρινόμενος ταχύτατα στις μεταβολές του φορτίου.

Ακόμη πιο ενδελεχή πρέπει να είναι η μελέτη των αρμονικών του μικροδικτύου, καθώς η λειτουργία του βασίζεται εξ' ολοκλήρου σε ηλεκτρονικά ισχύος. Αντίθετα με την περίπτωση των σύγχρονων ή ασύγχρονων γεννητριών, όπου η ημιτονοειδής κυματομορφή παράγεται από την περιστροφή ενός πηνίου (ημιτονοειδής μεταβολή μαγνητικού πεδίου), στους αντιστροφείς ισχύος η κυματομορφή αυτή συντίθεται από χιλιάδες παλμούς τάσης που παράγονται από τα IGBT. Για την περίπτωση των αντιστροφέων του μικροδικτύου, από μετρήσεις σε άλλα εργαστήρια έχει μετρηθεί η παραγωγή μιας τάσης πλάτους 0,6 Volt στην περιοχή των 15,75 KHz, πλευρικά των συχνοτήτων δηλαδή που λειτουργεί η γέφυρα για την παραγωγή της PWM ημιτονικής τάσης. Η περιοχή αυτή συχνοτήτων είναι έξω από την περιοχή στην οποία έχουν θεσπιστεί όρια αρμονικών.

Ένα σύγχρονο ηλεκτρικό δίκτυο, παρόλο που τροφοδοτείται από γεννήτριες, περιέχει αρμονικές καθώς μια σειρά διατάξεων λειτουργούν ως πηγές αρμονικών. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν οι κινητήρες, τα μαγνητικά κυκλώματα, οι συσκευές που χρησιμοποιούν ηλεκτρικά τόξα και κυρίως οι διατάξεις ισχύος που περιέχουν ημιαγωγούς (π.χ. τροφοδοτικά, διατάξεις ελέγχου στροφών κινητήρων). Εκτός από τις συνεπαγόμενες απώλειες που εμφανίζονται στο ηλεκτρικό δίκτυο ως συνέπεια των αρμονικών ρευμάτων, η ύπαρξη αυτών είναι επιζήμια για αρκετές ηλεκτρονικές συσκευές, καθώς προκαλούν υπερθέρμανση πολλών διατάξεων όπως μετασχηματιστών, πυκνωτών ή και κινητήρων.

Ένα μέτρο του μεγέθους της παραμορφώσεως της τάσης που προκαλείται από την ύπαρξη των αρμονικών αποτελεί ο Παράγων Αρμονικών (Harmonic Factor –HFv):

$$HFv = \frac{\sqrt{V_3^2 + V_5^2 + V_7^2 + \ldots + V_{(2n-1)}^2}}{V_1}$$

όπου $V_3, V_5, V_{(2n-1)}$, είναι το εύρος των αρμονικών περιττής τάξεως και V_1 το εύρος της θεμελιώδους (δηλαδή του βασικού ημιτόνου). Άρτιες αρμονικές πρακτικά δεν εμφανίζονται στα δίκτυα.

Αυτό που προκαλεί την παραμόρφωση της τάσεως είναι βασικά η ύπαρξη των αρμονικών ρευμάτων.

Αντίστοιχα με τον παράγοντα παραμόρφωσης τάσης ορίζεται και ο παράγοντας ολικής αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος ως:

$$THD = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \ldots + I_{(2n-1)}^2}}{I_1} \cdot 100\%$$

Για τα δίκτυα χαμηλής τάσης, στα οποία υπάγεται και το μικροδίκτυο που εξετάζουμε, διεθνείς προδιαγραφές ορίζουν το μέγιστο ποσοστό αρμονικών που μπορεί να υφίστανται μόνιμα:

- Περιττές αρμονικές τάξεως $h \leq 13$, $U_h \leq 5\%$,
- Περιττές αρμονικές τάξεως $h > 13$, $U_h \leq 1{,}5\%$,
- Άρτιες αρμονικές $U_h \leq 2\%$,

Στα manuals των συσκευών των δύο αντιστροφέων sunny boy και sunny island, αναφέρεται ως μέγιστη αρμονική παραμόρφωση 4% και 3% αντίστοιχα, ωστόσο οι τιμές αυτές είναι για γραμμικά φορτία και με ισχύ των αντιστροφέων μεγαλύτερη του μισού της ονο-

μαστικής τους. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των αρμονικών εξόδου τους όταν έχουμε συνθήκες όπως: ελάχιστη ή μέγιστη ισχύ εξόδου (εν συγκρίσει με την ονομαστική τους), έντονα επαγωγικά ή χωρητικά φορτία, ύπαρξη στο μικροδίκτυο συσκευών με ηλεκτρονικά ισχύος τα οποία είναι πηγές αρμονικών. Καλό παράδειγμα αποτελούν οι ηλεκτρονικοί λαμπτήρες φθορισμού, οι οποίοι λόγω της μεγάλης τους απόδοσης χρησιμοποιούνται ευρέως σε μικροδίκτυα και υβριδικά αυτόνομα συστήματα. Οι λαμπτήρες αυτοί έχουν επαγωγική συμπεριφορά. Η μελέτη της ποιότητας της τάσης είναι σημαντικότερο να γίνει όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί σε απομονωμένη λειτουργία από το κεντρικό δίκτυο ώστε να φανεί καλύτερα η συμπεριφορά του στις ακραίες αυτές καταστάσεις.

Είναι προφανές ότι η αξιοπιστία του μικροδικτύου είναι μεγαλύτερη αν η μέση παραμόρφωση της τάσης, βρίσκεται μέσα στα όρια που ορίζουν οι διεθνείς προδιαγραφές.

5.1.2 Μεταβατικές καταστάσεις

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η συμπεριφορά του μικροδικτύου στις μεταβατικές καταστάσεις, δηλαδή πως επηρεάζεται η τάση και η ένταση κατά την ζεύξη – απόζευξη του αντιστροφέα sunny boy, φορτίων και κινητήρων, γεγονότα που μπορεί να προκαλούν σημαντικές βυθίσεις ή ανυψώσεις στην τάση. Αντίθετα πάλι με την περίπτωση ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο η μεγάλη αδράνεια που παρουσιάζουν οι σύγχρονες γεννήτριες συμβάλει στη σταθερότητά του σε περιπτώσεις τέτοιων μεταβατικών καταστάσεων, στο μικροδίκτυο η συμπεριφορά αυτή στηρίζεται στην ταχεία απόκριση των διακοπτικών στοιχείων και των κυκλωμάτων ελέγχου τους. Απομένει λοιπόν η πειραματική επιβεβαίωση της ταχείας απόκρισης των ηλεκτρονικών ισχύος των αντιστροφέων καθώς και των συσσωρευτών στις γρήγορες μεταβολές της ισχύος στο μικροδίκτυο.

5.1.3 Σφάλματα

Μεγάλη σημασία έχει και η συμπεριφορά του μικροδικτύου στα σφάλματα είτε αυτά συμβαίνουν στο εσωτερικό του, είτε στο κεντρικό δίκτυο.

Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στη γραμμή φορτίων, ενώ το μικροδίκτυο λειτουργεί σε απομονωμένη λειτουργία, ο μικροαυτόματος των φορτίων θα ανοίξει προστατεύοντας φορτία και αντιστροφείς. Οι αυτόματοι διακόπτες του αντιστροφέα sunny island από την πλευρά εναλλασσόμενης τάσης, αντέχουν διαρκή ρεύματα έως και 16A (που αντιστοιχούν σε ισχύ 3,7KVA), ενώ από την πλευρά της συνεχούς τάσης ο μικροαυτόματος μπορεί να διαχειριστεί υπερεντάσεις έως και 20KA. Ωστόσο, καθώς ο αντιστροφέας μπορεί να διαχειριστεί ισχύ έως και 6,6KVA για λίγα δευτερόλεπτα είναι πολύ πιθανόν, έστω και για σύντομο χρονικό διάστημα, ο αντιστροφέας να προσπαθήσει να παρέχει τα μεγάλα ρεύματα βραχυκυκλώσεως μέχρι να επέμβουν οι μικροαυτόματοι. Δεδομένου ότι ο αντιστροφέας δεν διαθέτει διαφορικό έλεγχο της συχνότητας ή της σύνθετης αντίστασης του μικροδικτύου, δεν θα καταλάβει ότι πρόκειται για σφάλμα. Έχει μεγάλη σημασία λοιπόν να μετρηθεί η συμπεριφορά του σε ένα εσωτερικό σφάλμα καθώς χρόνοι έστω και ελάχιστων δευτερολέπτων μπορεί να είναι καταστροφικοί για διατάξεις του μικροδικτύου.

Εάν το σφάλμα δεν προκαλέσει μεγάλα ρεύματα βραχυκύκλωσης, απλά κάποια μεγάλα ρεύματα υπερφόρτισης, τότε η χαρακτηριστική καμπύλη διακοπής της ασφάλειας AC του αντιστροφέα είναι αυτή που καθορίζει τον χρόνο της απόκρισης. Για μια ισχύ εξόδου διπλάσια της ονομαστικής η ασφάλεια θα πέσει σε κάποια δευτερόλεπτα. Αν η ισχύς εξόδου είναι μεταξύ 1 έως 1,3 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής τότε πάλι η καμπύλη της ασφάλειας καθώς και η θερμοκρασία είναι που καθορίζουν την διακοπή. Ο αντιστροφέας μπορεί να παρέχει αυτή την ισχύ μέχρι να ζεσταθεί υπερβολικά ώστε να σταματήσει την λειτουργία του (ίσως μετά από λίγες ώρες ή και καθόλου).

Ενώ από τη μια μεριά ο αντιστροφέας πρέπει να χειρίζεται τα σφάλματα, από την άλλη πρέπει να είναι ανεκτικός σε υπερεντάσεις που προκαλούνται από συσκευές όταν εκκινούν (π.χ. ψυγεία, συμπιεστές, τηλεοράσεις).

Αντίθετα από τον αντιστροφέα sunny island ο αντιστροφέας των φ/β θα εντοπίσει γρηγορότερα ένα σφάλμα ή υπερένταση στο δίκτυο, καθώς διαθέτει διαφορικό έλεγχο της αντίστασης και της συχνότητας του δικτύου. Η ανοχή αυτή μπορεί να ρυθμιστεί, τόσο ποσοτικά όσο και χρονικά.

Πιο δύσκολη είναι η περίπτωση σε σφάλμα στο εξωτερικό δίκτυο, όταν το μικροδίκτυο είναι διασυνδεδεμένο με αυτό. Στην περίπτωση αυτή δύο καταστάσεις μπορούν να ακολουθήσουν.

Εάν ο αντιστροφέας έχει ρυθμιστεί σε λειτουργία grid-I, και διακοπεί τελείως η σύνδεση με το δίκτυο από μία προστασία του δικτύου που παρεμβάλλεται μεταξύ σφάλματος-μικροδικτύου, τότε ο αντιστροφέας μπορεί να κάνει αυτόματα μεταγωγή σε λειτουργία grid-U, αποσυνδέοντας τον αυτόματο διακόπτη που ελέγχει την διασύνδεση του με το κεντρικό δίκτυο (PCC) (προηγούμενη διάταξη του μικροδικτύου με αυτόματη μεταγωγή).

Η άλλη περίπτωση είναι η διακοπή στο δίκτυο να γίνει όχι από τη μεριά σφάλμα – μικροδίκτυο, αλλά στην πλευρά σφάλμα – ΜΣ ΜΤ/ΧΤ, οπότε το μικροδίκτυο θα βρεθεί διασυνδεδεμένο με πάρα πολλά φορτία και καθόλου γεννήτριες.

Με μια συνδεσμολογία αντιστροφέα αυτόματης μετάβασης από RUN-I σε RUN-U, ο αντιστροφέας είναι δυνατόν να μεταβεί σε κατάσταση τροφοδότησης του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή θα προσπαθήσει να τροφοδοτήσει αυτά τα φορτία παράγοντας μεγάλο ρεύμα, ενώ θα ενεργοποιηθεί η ασφάλεια όταν το ρεύμα ξεπεράσει τα 16A.

Με την παρούσα συνδεσμολογία του μικροδικτύου, στην οποία δεν είναι δυνατή η αυτόματη μετάβαση μεταξύ των δύο καταστάσεων RUN-U και RUN-U_EXT όταν χαθεί η τάση στο εξωτερικό δίκτυο, ο αντιστροφέας διακόπτει τη λειτουργία του.

Αντίθετα από τον αντιστροφέα sunny island, ο αντιστροφέας των φωτοβολταϊκών sunny boy πιθανώς θα αποσυνδεθεί πολύ πιο γρήγορα καθώς διαθέτει διαφορικό έλεγχο της αντίστασης και της συχνότητας του δικτύου, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.

Ας σημειωθεί πάντως ότι οι αντιστροφείς είναι η διάταξη που φαίνεται ότι παρουσιάζει τα περισσότερα σφάλματα σε αυτόνομα δίκτυα ή δίκτυα συνδεδεμένα με το κεντρικό. Και βασικότερη αιτία είναι οι συχνές υπερτάσεις του κεντρικού δικτύου οι οποίες μπορεί να είναι ανεκτές για τις διατάξεις προστασίας του κεντρικού δικτύου, αλλά καθόλου ανεκτές για τα ευαίσθητα ηλεκτρονικά ισχύος των αντιστροφέων.

5.1.4 Ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση (EMI)

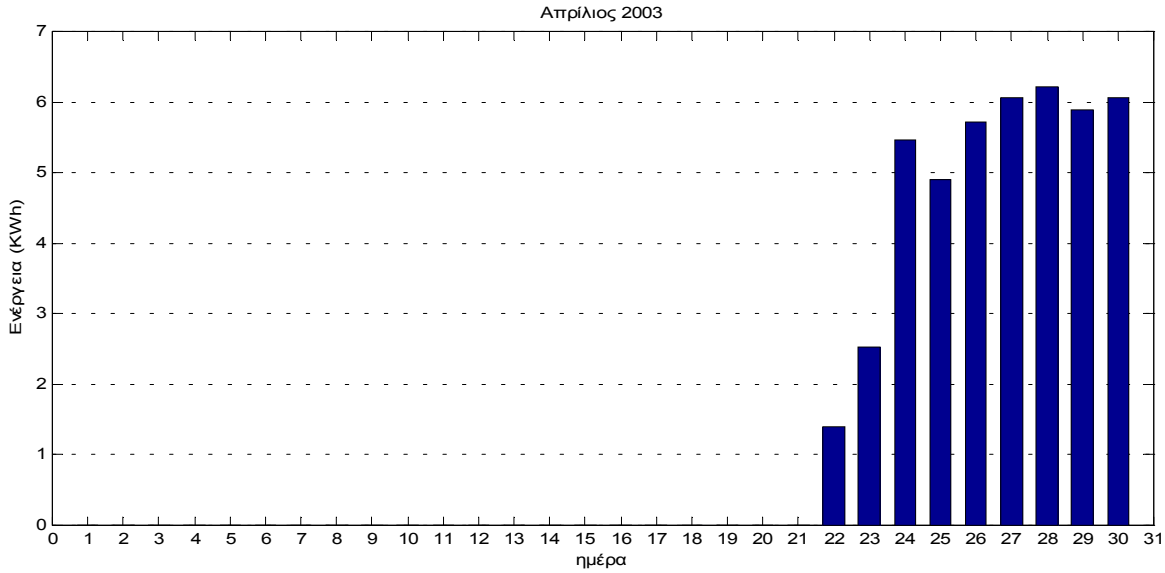
Η υψηλή διακοπτική συχνότητα των ηλεκτρονικών αντιστροφέων του μικροδικτύου, αναπόφευκτα οδηγεί στην δημιουργία ηλεκτρομαγνητικού θορύβου. Ο θόρυβος της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης εκπέμπεται από συσκευές που χρησιμοποιούν διακοπτικά στοιχεία είτε μέσω των καλωδίων του δικτύου, είτε με ακτινοβολία.

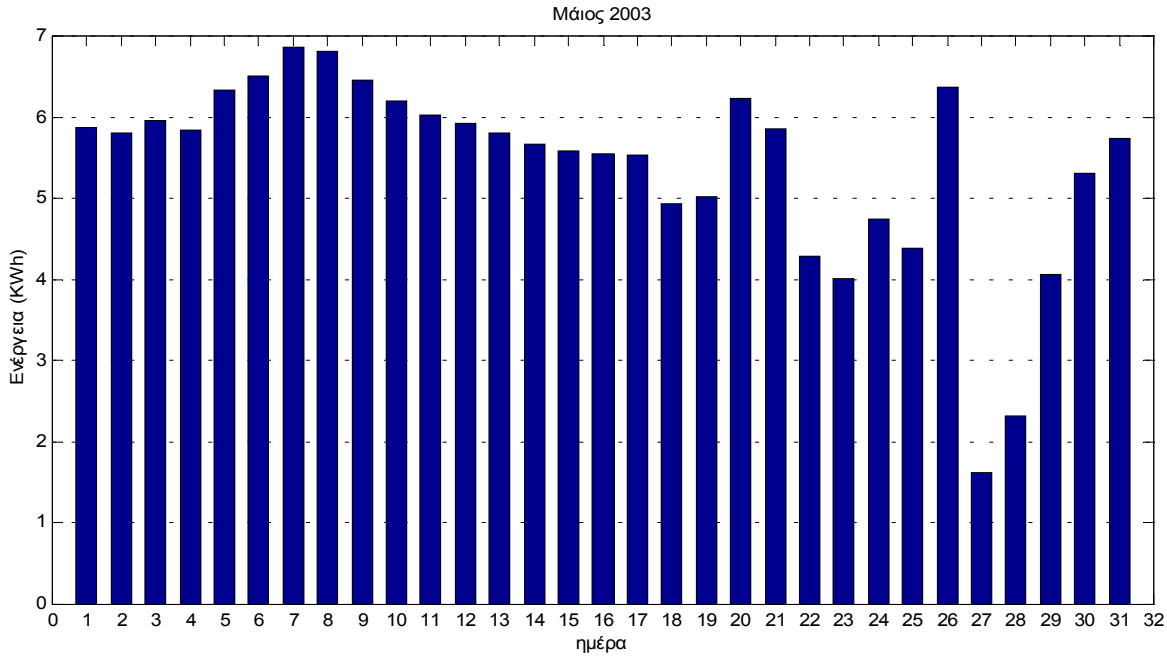
Οι μικροί χρόνοι ανόδου και καθόδου των παραγόμενων κυματομορφών που παράγονται από τα τρανζίστορ ισχύος (τα IGBT στο μικροδίκτυο) είναι η αιτία για την παραγωγή μετρήσιμης ισχύος αρμονικών συχνοτήτων στην περιοχή των ραδιοφωνικών συχνοτήτων (RF).

5.2 Στατιστικά στοιχεία από το sunny data control

5.2.1 Στατιστικά στοιχεία μηνιαίας παραγωγής ενέργειας από το sunny boy (Απρίλιος 2003 – Ιούνιος 2004)

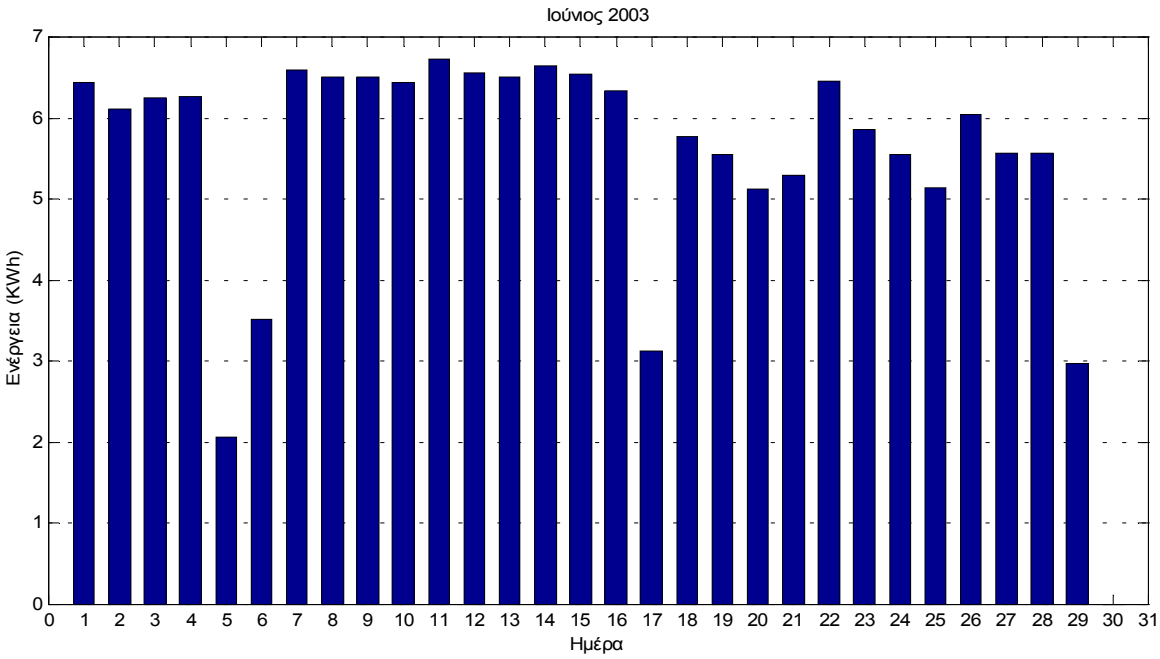
Μέσω του προγράμματος sunny data control, παίρνουμε τα διαγράμματα της ημερήσιας παραγωγής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, συνολικής ισχύος 1100Wp. Η ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καταγράφεται σε KWh. Οι μήνες καταγραφής καλύπτουν ένα έτος (Απρίλιος 2003 – Ιούνιος 2004), δίνοντας έτσι και μια γενική εικόνα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Αθήνα. Στις ημέρες που δεν εμφανίζεται παραγωγή ενέργειας, ο αντιστροφέας προφανώς ήταν αποσυνδεδεμένος.



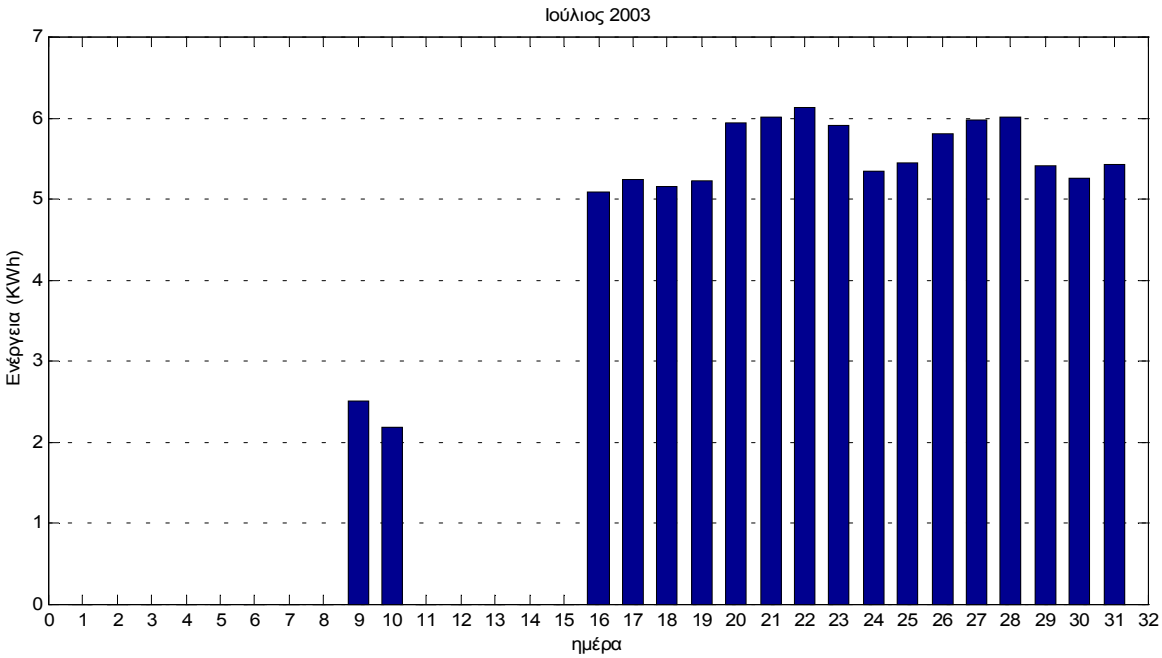


Σύνολο παραγόμενης ενέργειας για το μήνα Μάιο:
Etotal = 167,615008 KWh

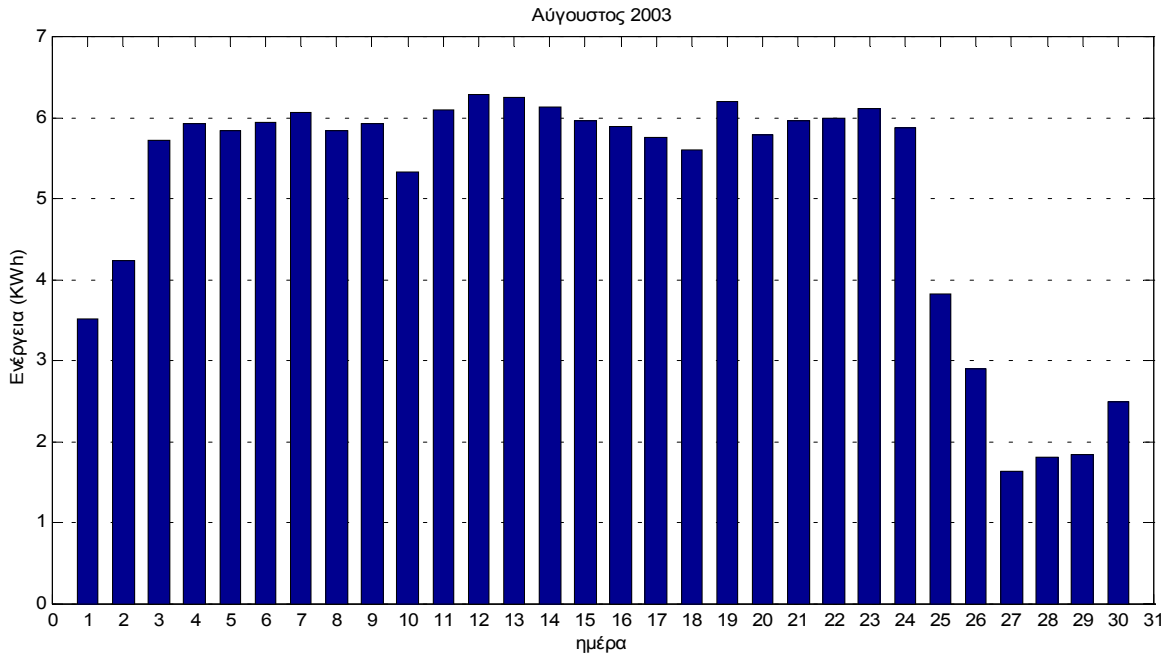
Ο μήνας Μάιος, λόγω της μεγάλης ηλιοφάνειας αλλά και των όχι τόσο μεγάλων θερμοκρασιών παρουσιάζει αιχμή συγκριτικά με τους υπολοίπους στην συνολική ημερήσια παραγωγή και αθροιστικά.



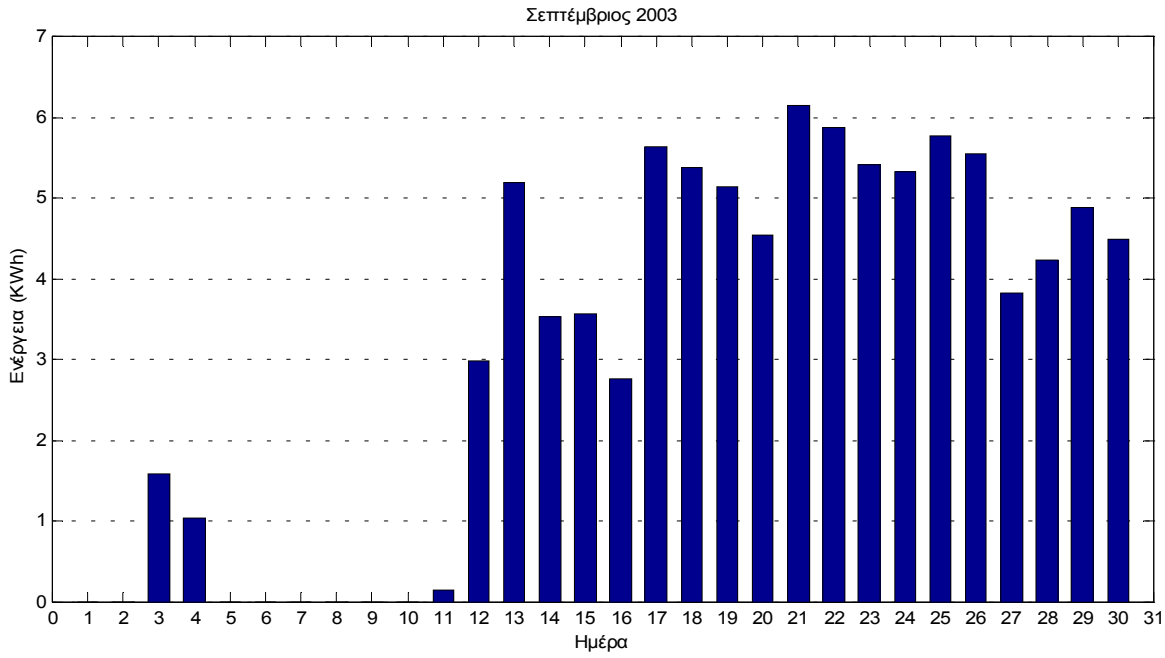
Σύνολο παραγόμενης ενέργειας για το μήνα Ιούνιο:
Etotal = 163.986008 KWh



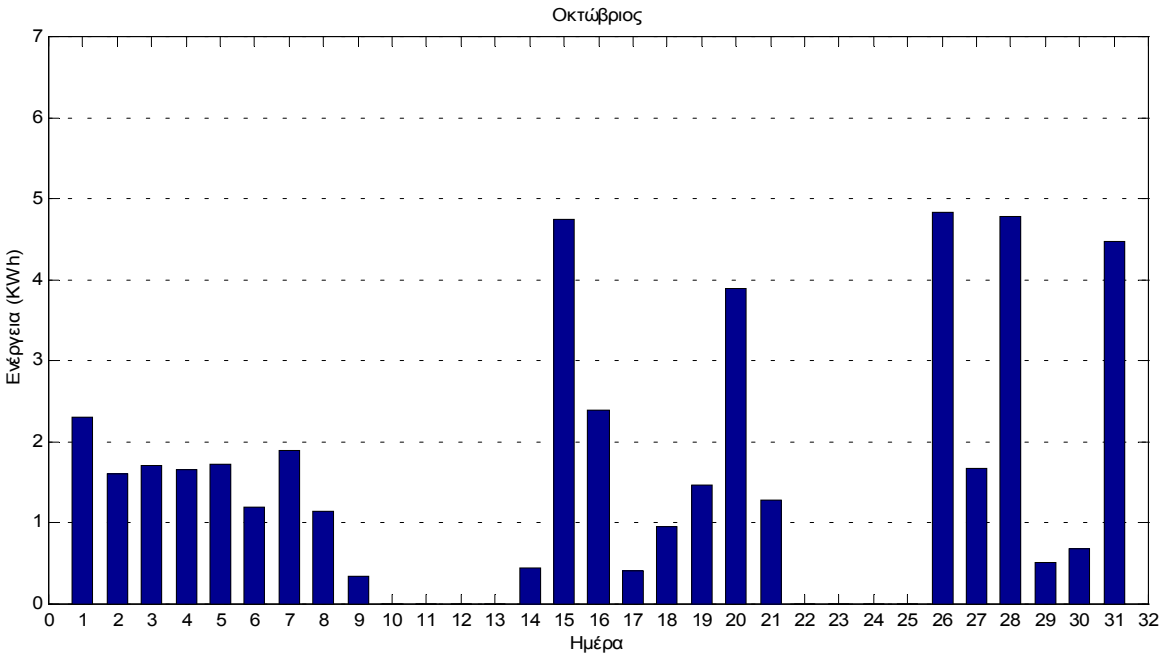
Σύνολο παραγόμενης ενέργειας για το μήνα Ιούλιο:
Etotal = 94.08100447 KWh



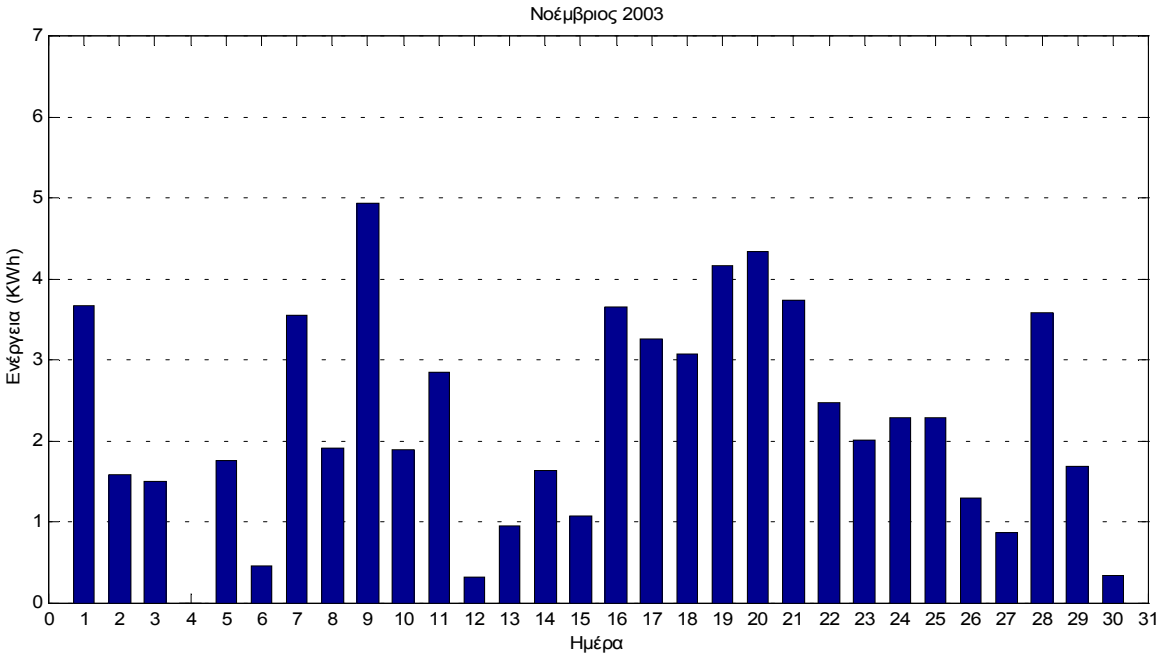
Σύνολο παραγόμενης ενέργειας για το μήνα Αύγουστο:
Etotal = 152.7330073 KWh



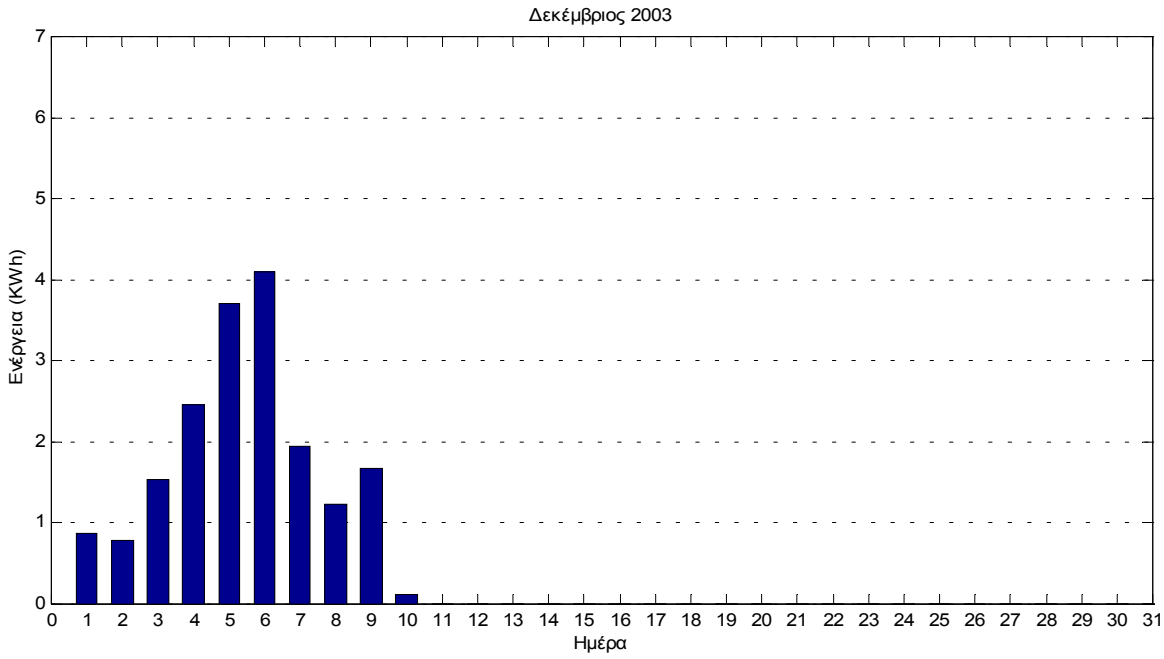
Σύνολο παραγόμενης ενέργειας για το μήνα Σεπτέμβριο:
Etotal = 92.98900442 KWh

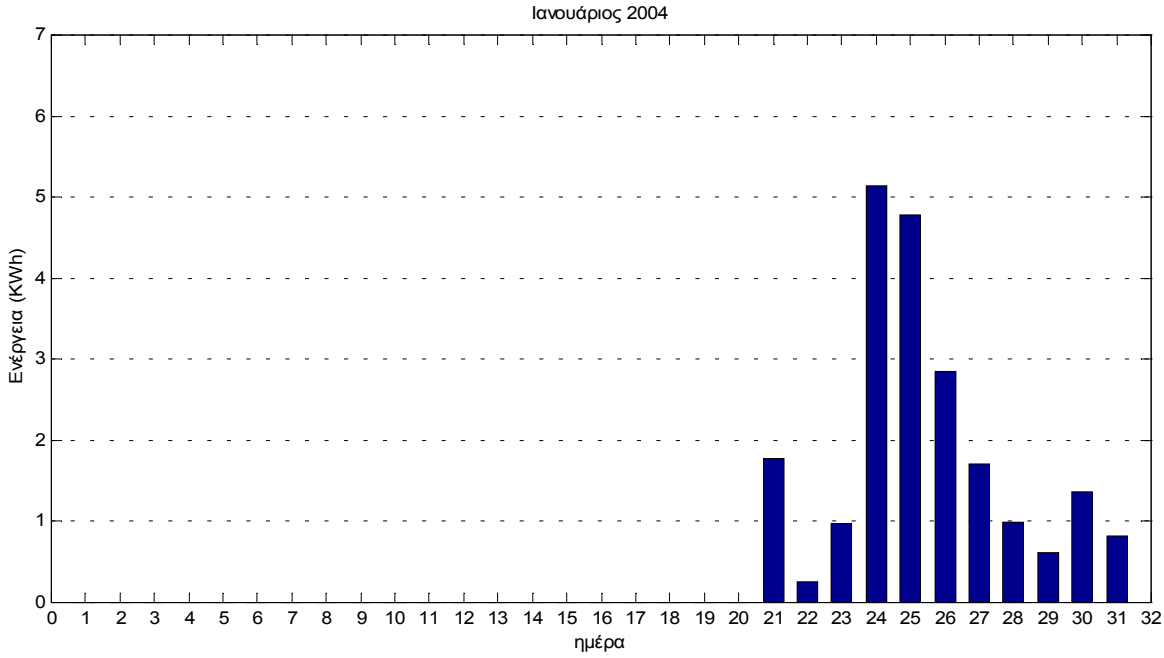


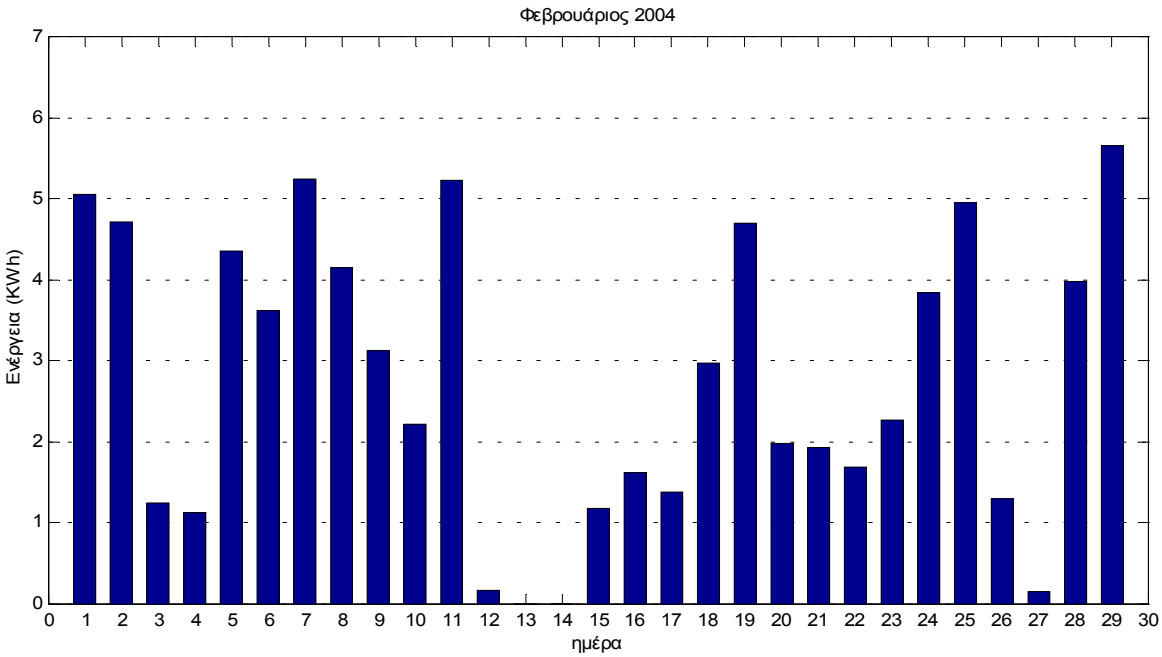
Σύνολο παραγόμενης ενέργειας για το μήνα Οκτώβριο:
Etotal = 46.11600219 KWh



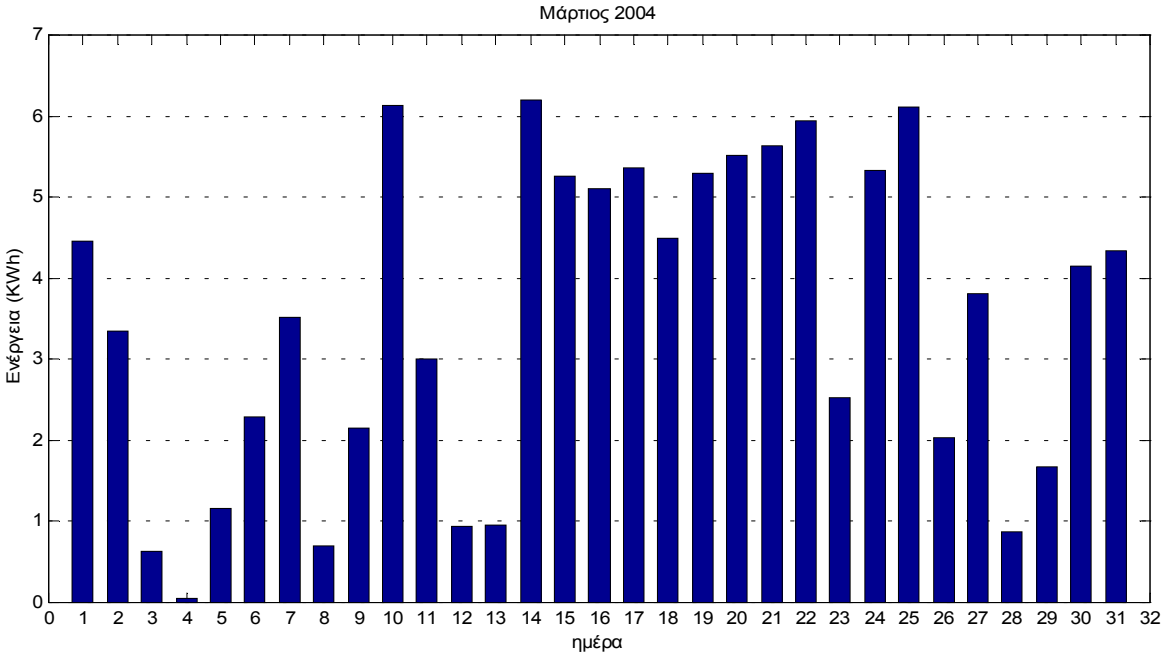
Σύνολο παραγόμενης ενέργειας για το μήνα Νοέμβριο:
Etotal = 67.19000319 KWh


Δεκέμβριος 2003
Ενέργεια (KWh)
Ημέρα

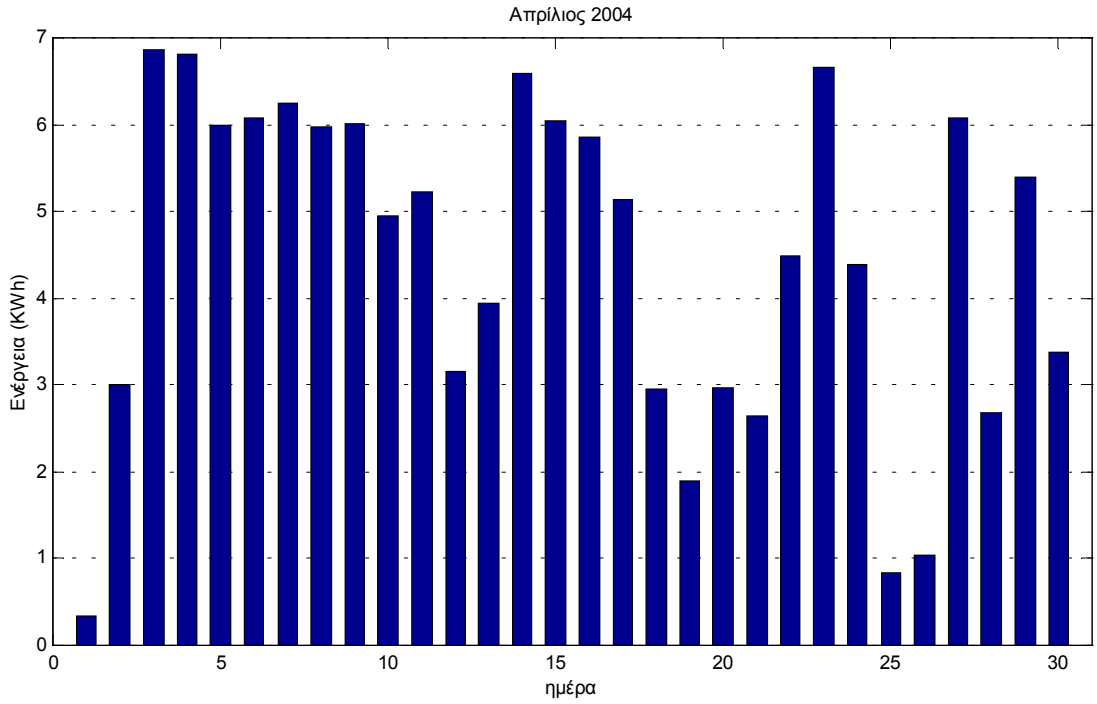

Ιανουάριος 2004
Ενέργεια (KWh)
ημέρα



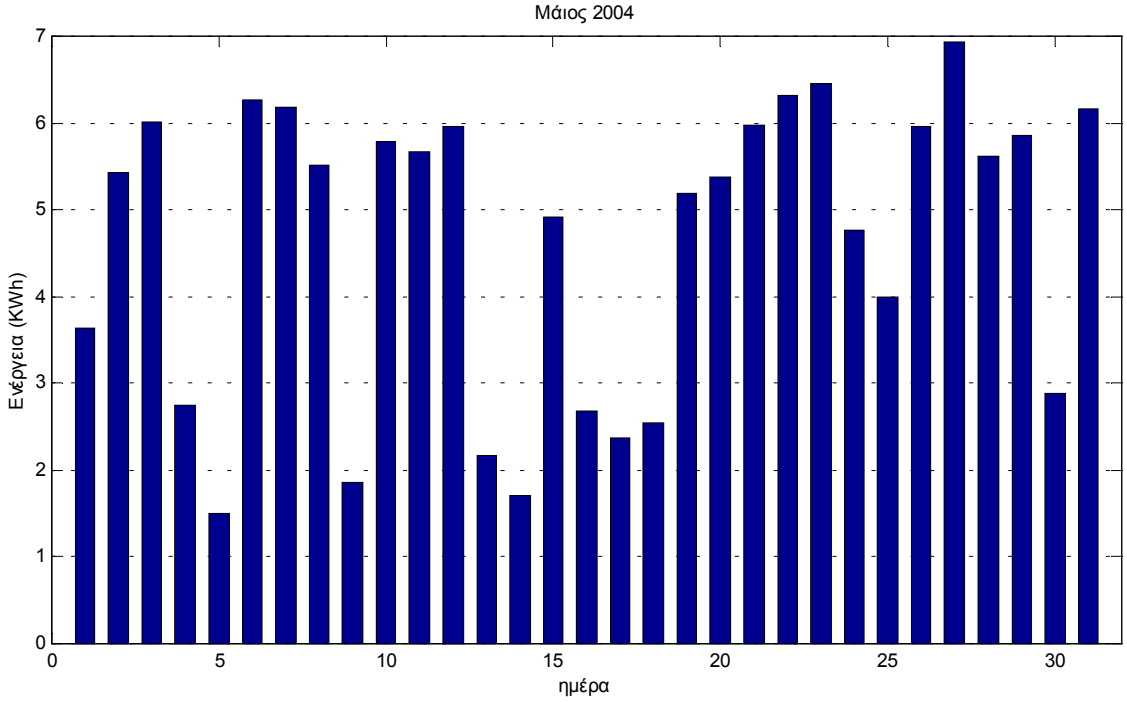
Συνολικά παραγόμενη ενέργεια τον Φεβρουάριο:
Etotal= 79.81300379 KWh



Συνολικά παραγόμενη ενέργεια τον Μάρτιο:
Etotal= 108.9220052 KWh

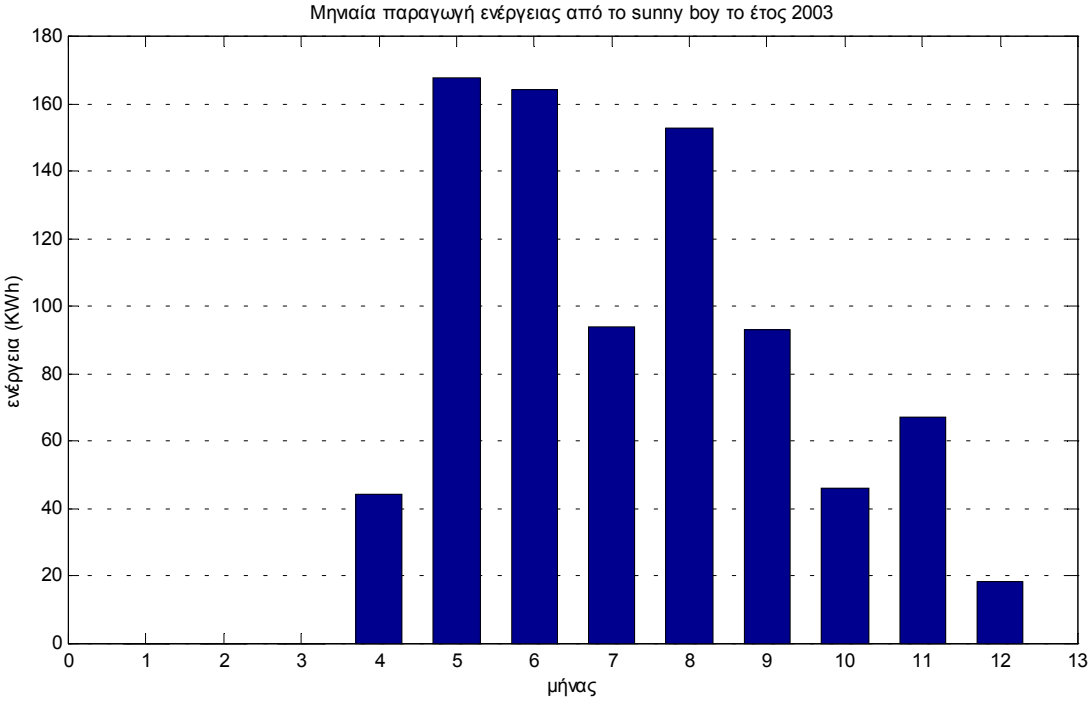


Συνολικά παραγόμενη ενέργεια τον Απρίλιο:
Etotal= 133.66 KWh



Συνολικά παραγόμενη ενέργεια τον Μάιο: 144,44 KWh

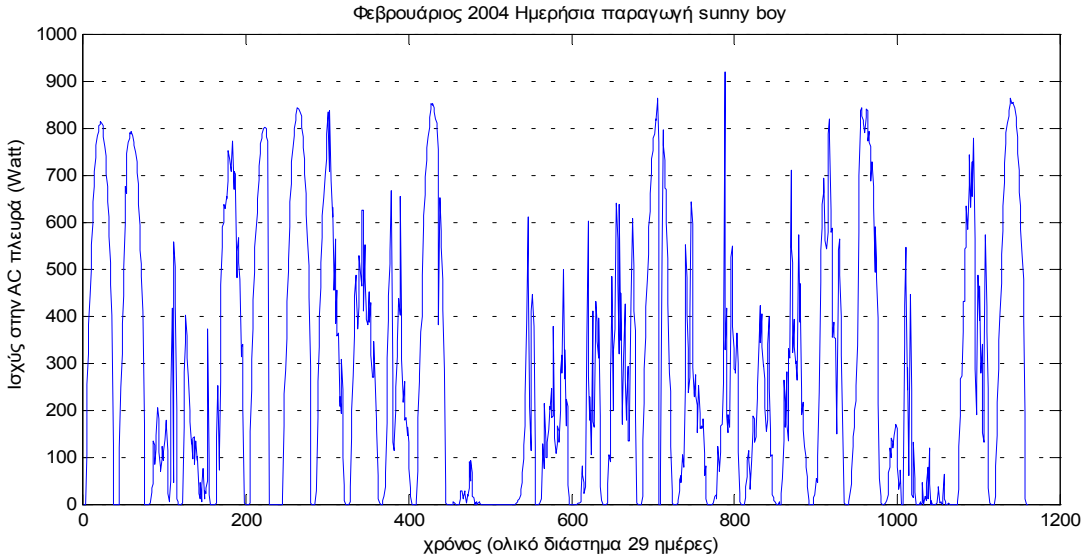
5.2.2 Ετήσια παραγωγή ενέργειας sunny boy



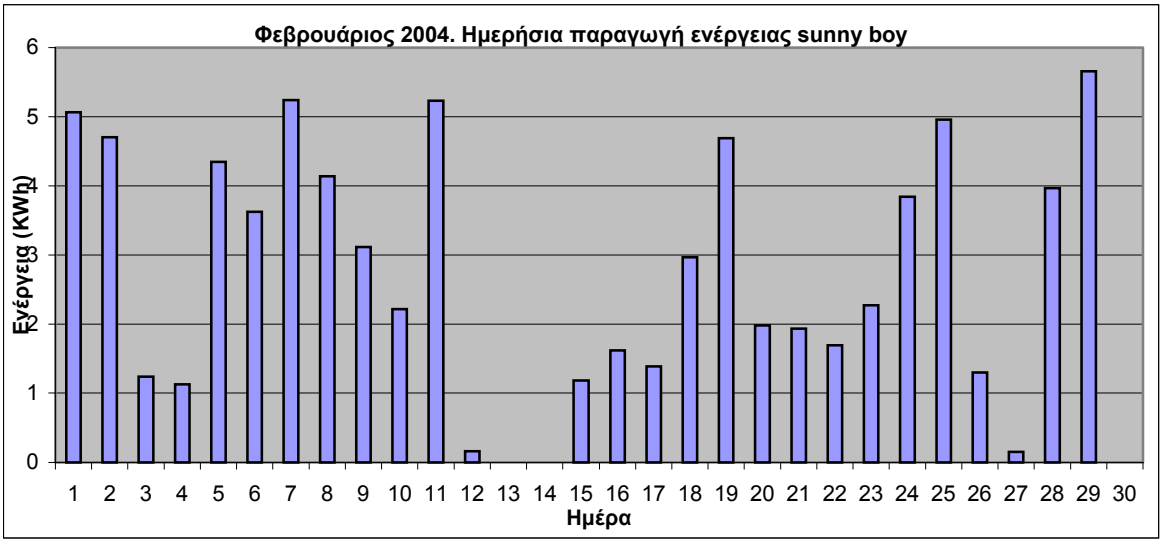
Συνολικά παραγόμενη ενέργεια για τους μήνες λειτουργίας το έτος 2003:
Etotal= 847,40604 KWh

Συνολικά παραγόμενη ενέργεια για τους μήνες Ιανουάριο – Μάιο 2004:
Etotal= 488,097 KWh

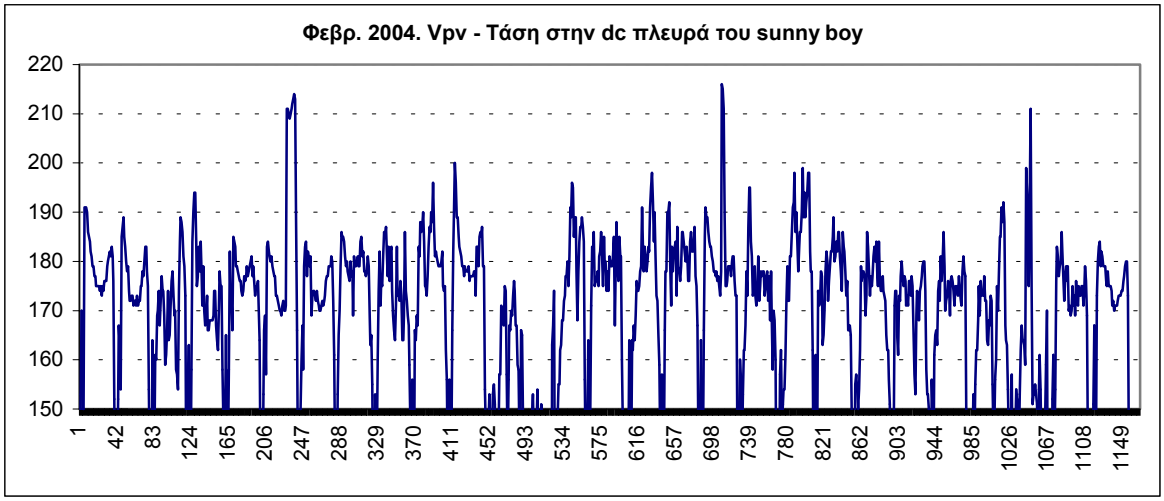
5.2.3 Στοιχεία λειτουργίας sunny boy, Φεβρουάριος 2004



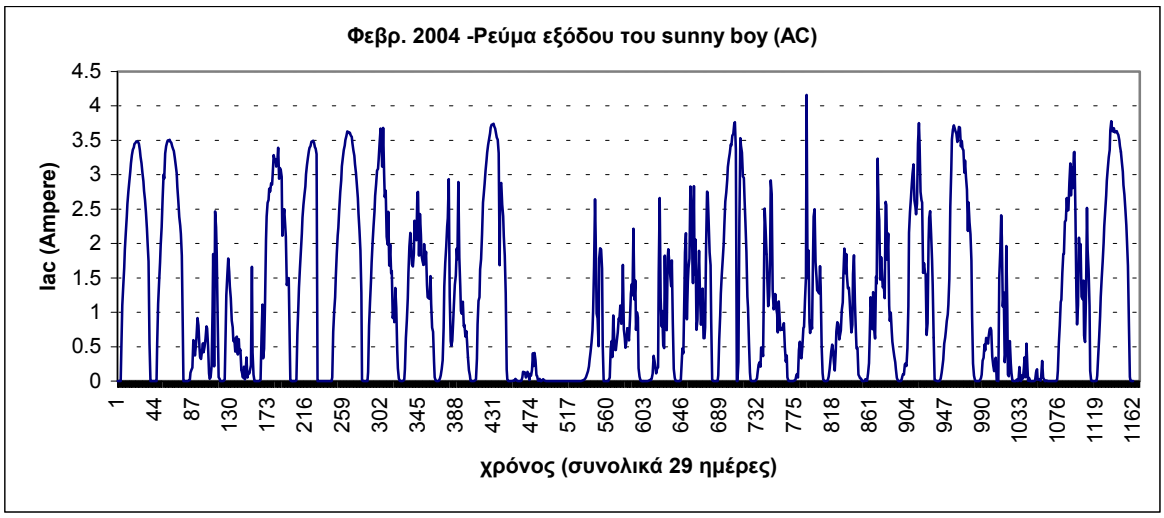
Αιχμή ισχύος Pmax = 920 Watt, στις 13:15



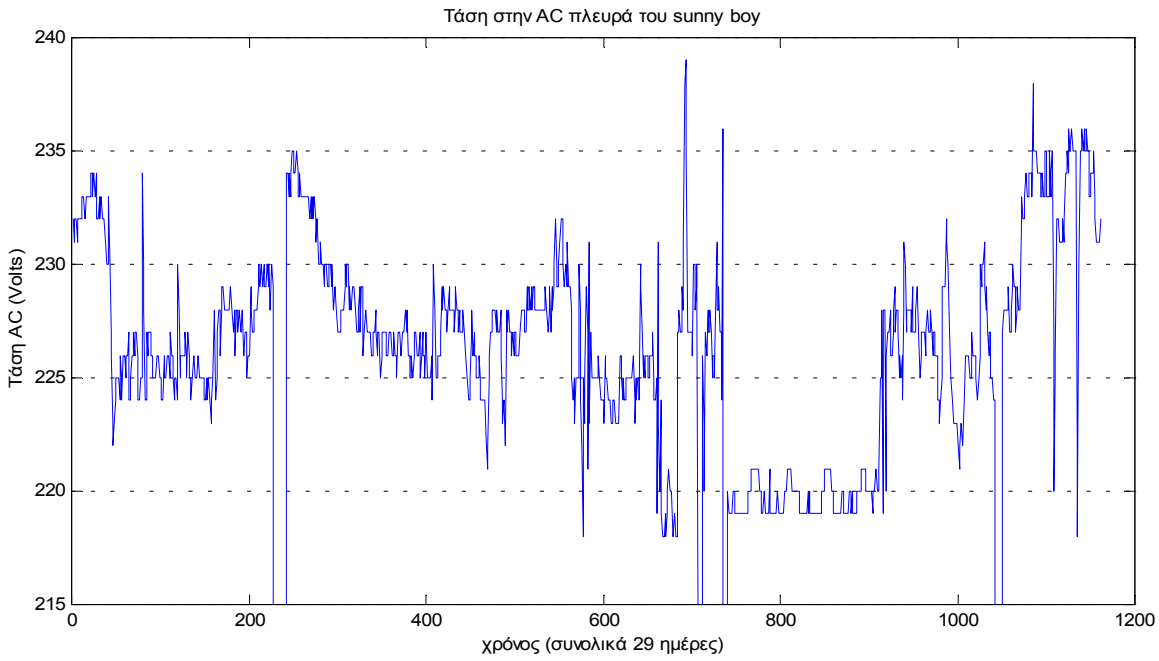
Σύνολο παραγωγής Φεβρουαρίου 2004:
Etotal= 79.81300379 KWh



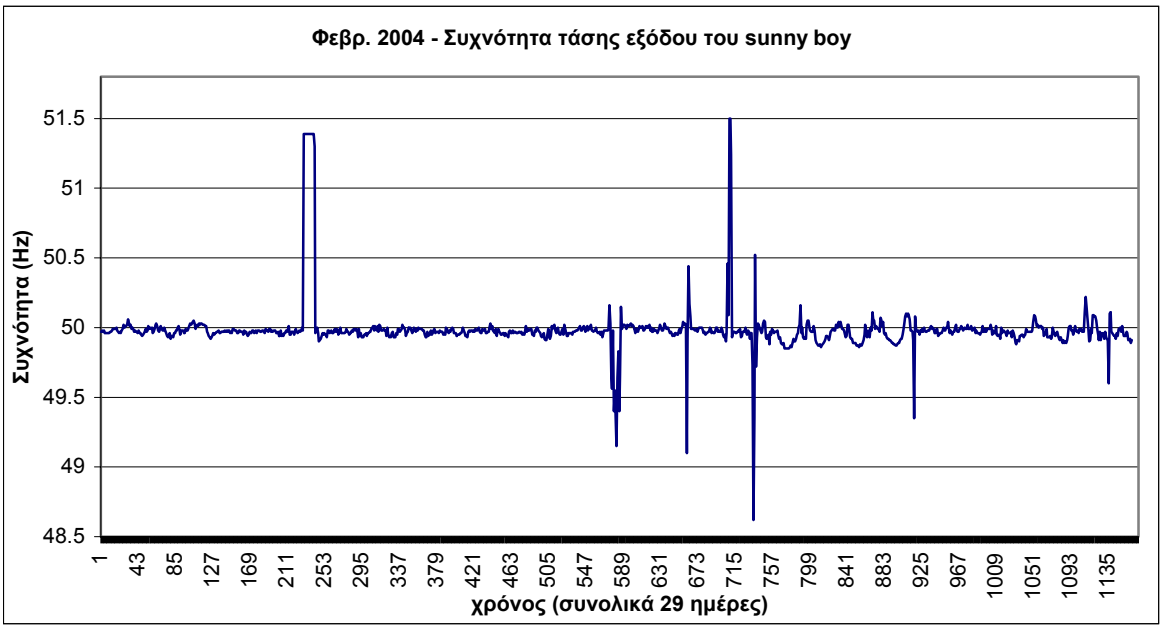
Αντίθετα από το ρεύμα και την ισχύ, η τάση δεν ακολουθεί την ομοιόμορφη καμπύλη της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς το κύκλωμα ελέγχου MPPT, προσπαθεί να ρυθμίζει αυτήν στο σημείο μέγιστης παραγόμενης ισχύος.



Το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών ακολουθεί την καμπύλη της ημερήσιας ηλιοφάνειας

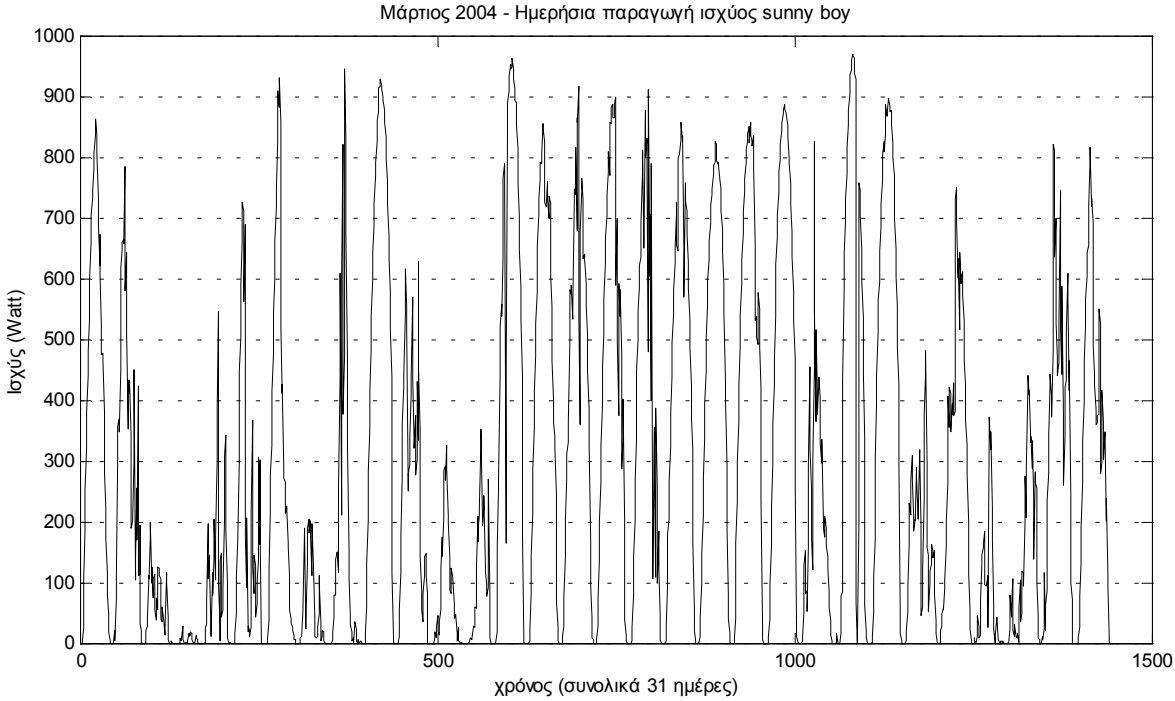


RMS τάση στην AC πλευρά του αντιστροφέα sunny boy. Ουσιαστικά πρόκειται για την τάση του μικροδικτύου (αν πρόκειται για αυτόνομη λειτουργία) ή του κεντρικού δικτύου (αν πρόκειται για διασυνδεδεμένη λειτουργία)

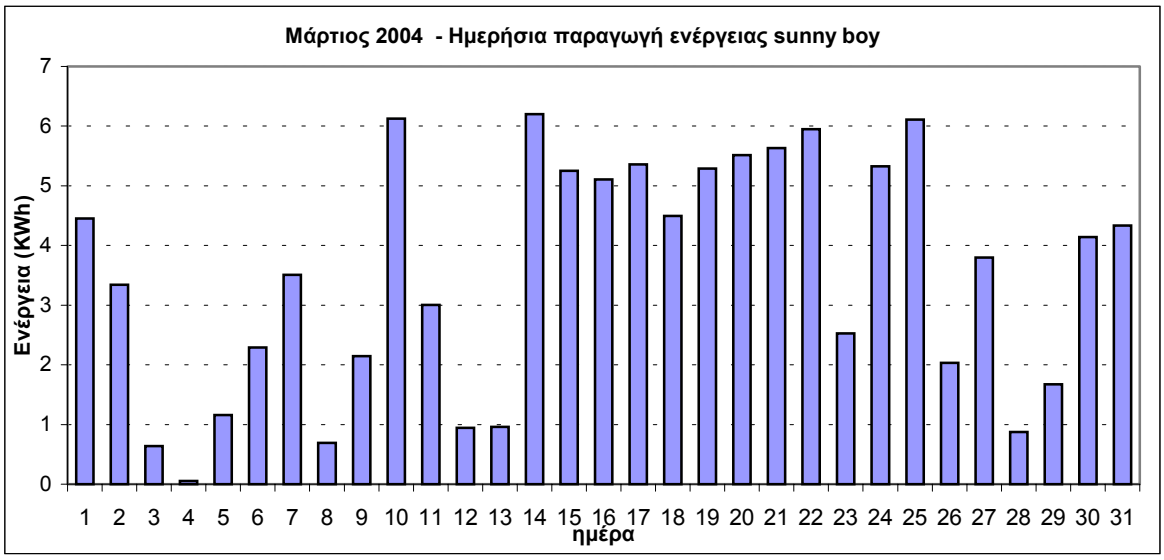


7 υπερβάσεις του ορίου της συχνότητας πάνω από 0,5 Hz, προφανώς σε περιπτώσεις χειρισμού του μικροδικτύου

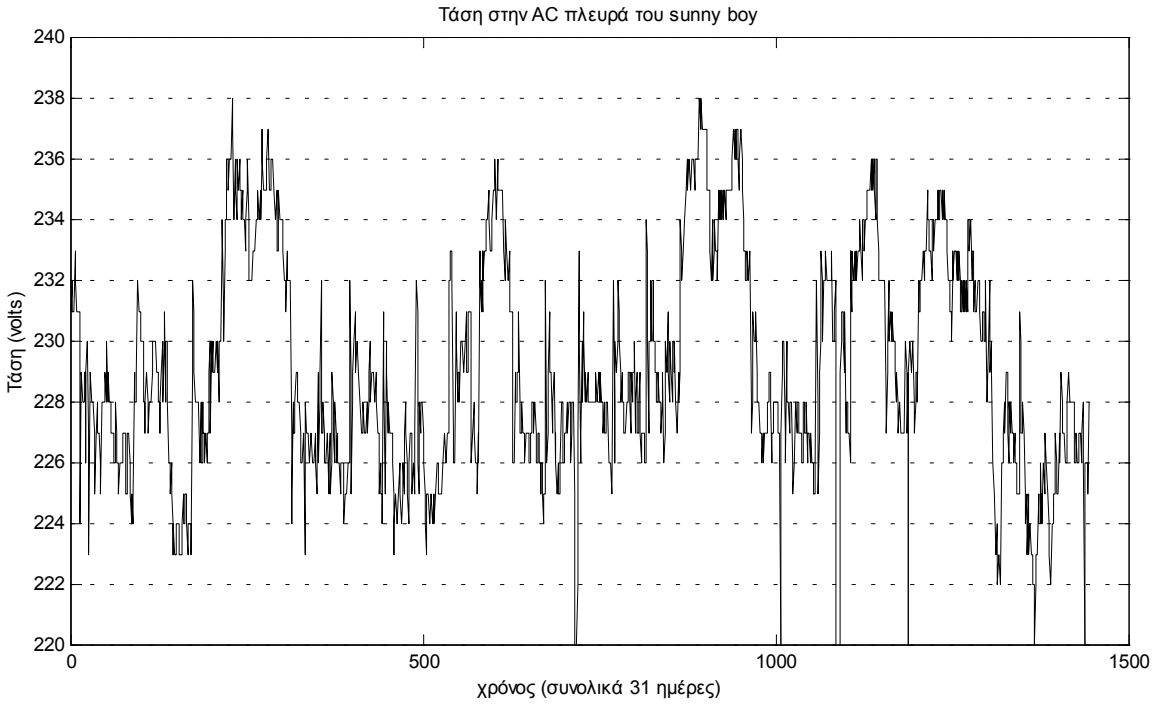
5.2.4 Στοιχεία λειτουργίας sunny boy, Μάρτιος 2004



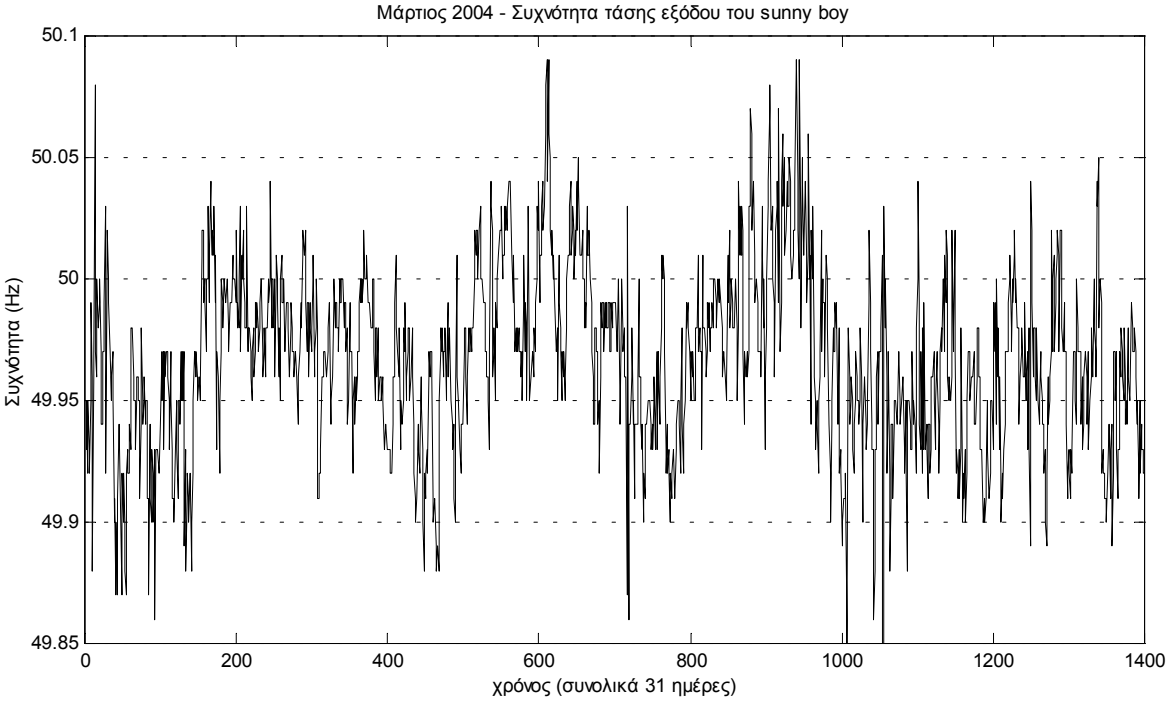
Αιχμή ισχύος Pmax= 970 Watt, στις 24-3-2004, ώρα 14:00



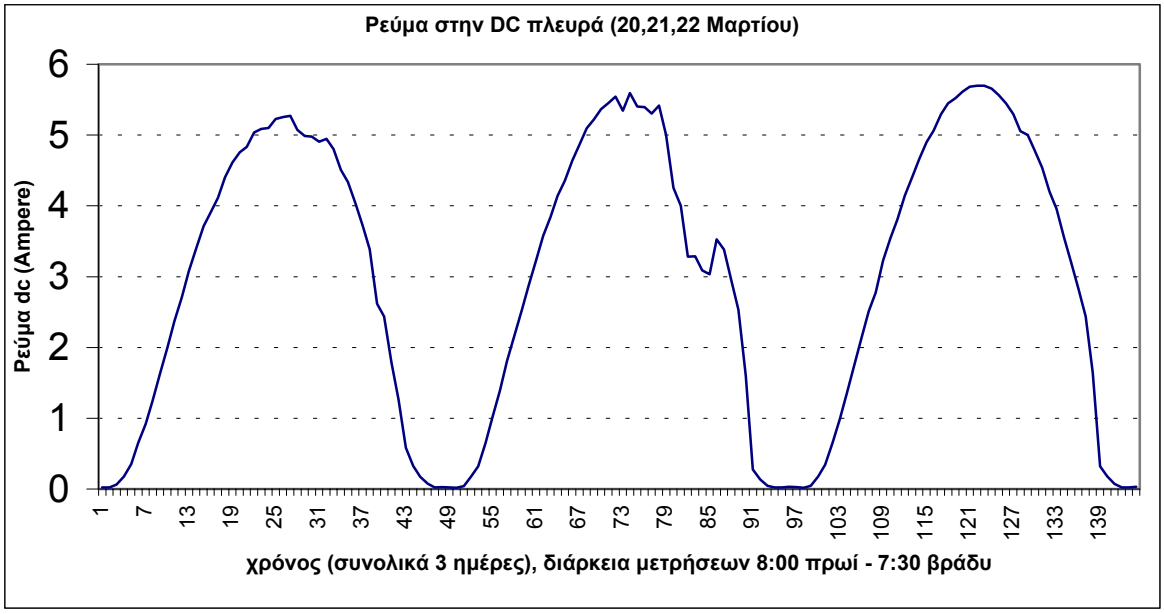
Σύνολο παραγωγής Μαρτίου 2004
Etotal= 108.922 KWh



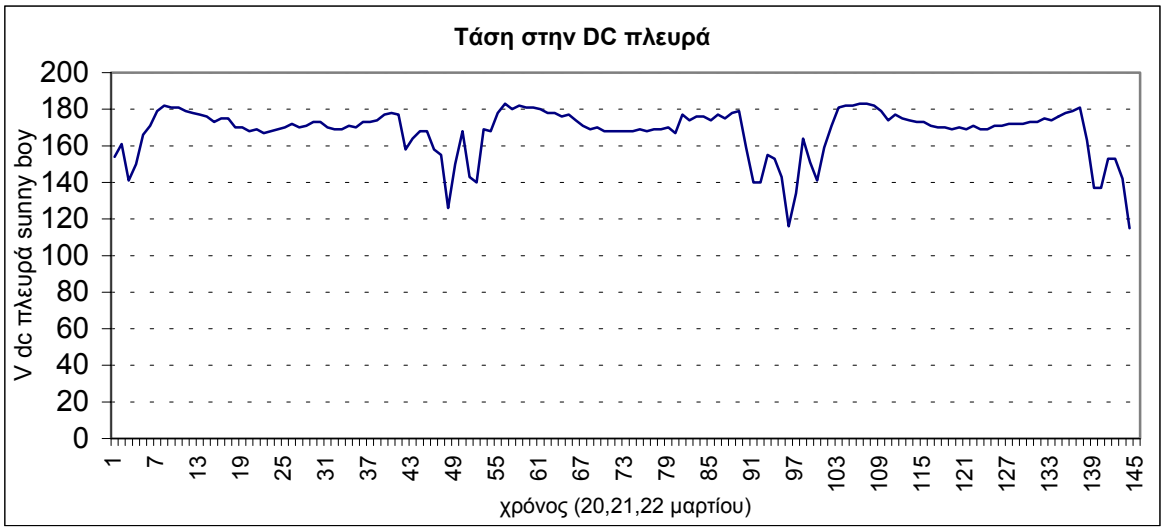
Η τάση του δικτύου δεν κρατά σταθερή τιμή, το ίδιο και ο αντιστροφέας που ακολουθεί την τάση αυτή



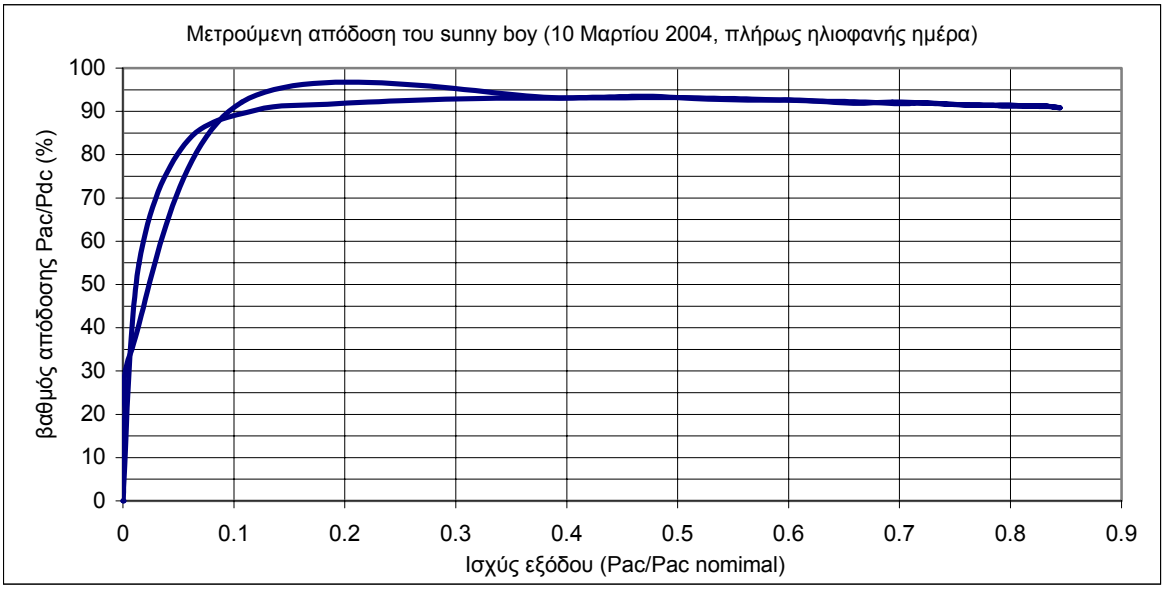
Η συχνότητα στο δίκτυο κρατά σταθερή συνεχώς τιμή 50Hz. Σε διάρκεια ενός μήνα, αυτή κυμαίνεται σε εύρος +-0,15Hz



Τυπικές κυματομορφές του ρεύματος των φωτοβολταϊκών κατά τη διάρκεια τριών πλήρως ηλιοφανών ημερών



Τάση στην dc πλευρά το ίδιο χρονικό διάστημα (ο αντιστροφέας λειτουργεί σε MPPT mode)



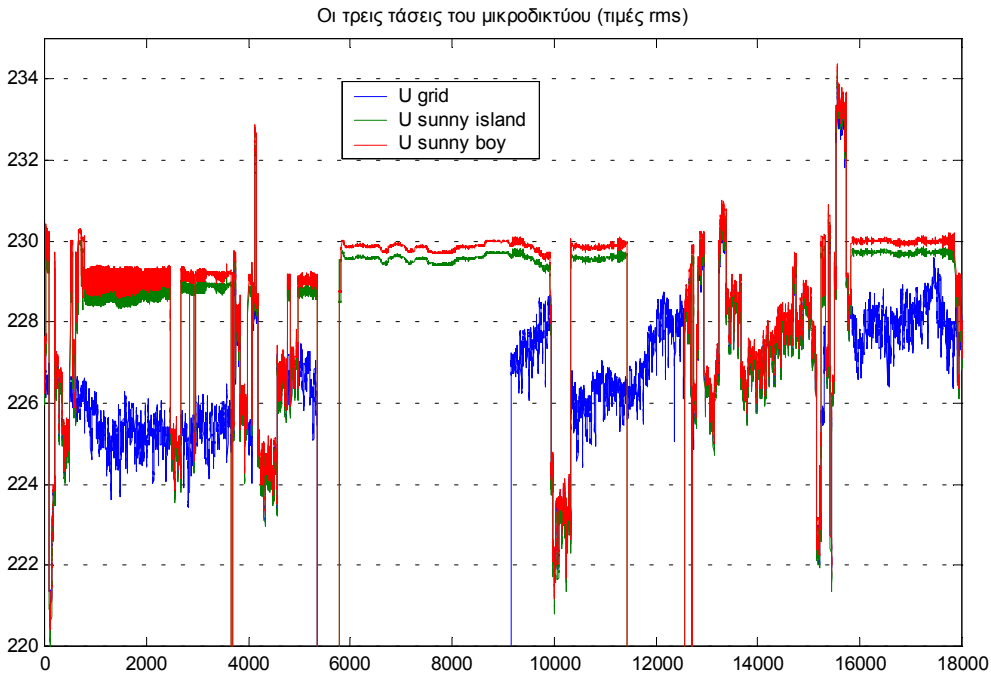
Μετρηθείσα καμπύλη του βαθμού απόδοσης του αντιστροφέα sunny boy, για μια πλήρως ηλιοφανή ημέρα με κανονική θερμοκρασία περιβάλλοντος (10 Μαρτίου 2004). Ο αντιστροφέας παρουσιάζει πολύ μικρή απόδοση σε ισχύ εξόδου μικρότερη του 10% της ονομαστικής, τη μέγιστη απόδοση για ισχύ εξόδου μεταξύ 20% και 30% της ονομαστικής, και περίπου σταθερό βαθμό απόδοσης 93% για ισχύ εξόδου από 30 έως και 85% της ονομαστικής.

5.3 Καταγραφή λειτουργίας – τυπικές κυματομορφές

5.3.1 Μετρήσεις σύνδεσης – αποσύνδεσης με το δίκτυο

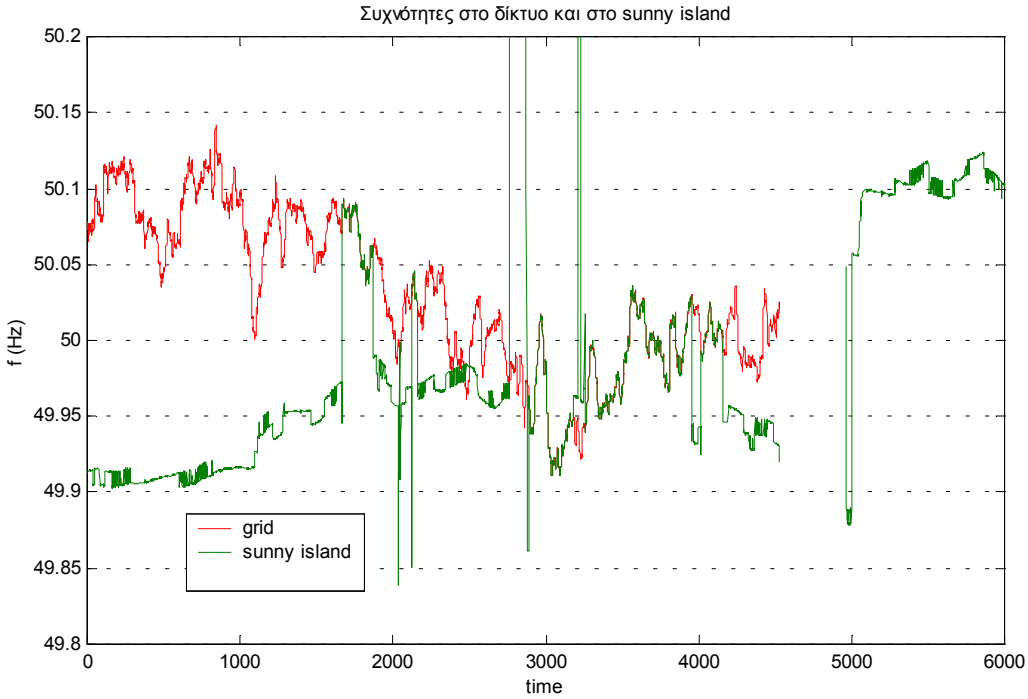
Οι παρακάτω μετρήσεις έγιναν αμέσως μετά την αναβάθμιση των αντιστροφέων του μικροδικτύου στις 29/10/2003, τόσο σε απομονωμένη, όσο και σε διασυνδεδεμένη με το δίκτυο λειτουργία.

Κατά τις μετρήσεις αυτές το μικροδίκτυο λειτούργησε τόσο σε διασυνδεδεμένη με το κεντρικό δίκτυο λειτουργία (grid-connected mode) όσο και σε απομονωμένη (island mode). Στην δεύτερη περίπτωση ο αντιστροφέας sunny island ήταν ο μοναδικός ρυθμιστής της τάσης και της συχνότητας. Δεδομένης της μικρής ηλιοφάνειας τη συγκεκριμένη ημέρα, η παραγόμενη ισχύς από τα φωτοβολταϊκά ήταν σχετικά μικρή. Τα φορτία που δοκιμάστηκαν στο μικροδίκτυο ήταν οι λαμπτήρες φωτισμού, πρώτα οι κοινοί (ωμικά φορτία) και μετά οι ηλεκτρονικοί (ωμικά και επαγωγικά φορτία) καθώς και ένας κινητήρας (τρυπάνι), ο οποίος και χρησίμευσε ως ένα φορτίο με απότομη αιχμή ζήτησης. Οι μετρήσεις κράτησαν 3 λεπτά, και για κάθε μέγεθος έγιναν περίπου18.000 δειγματοληψίες.



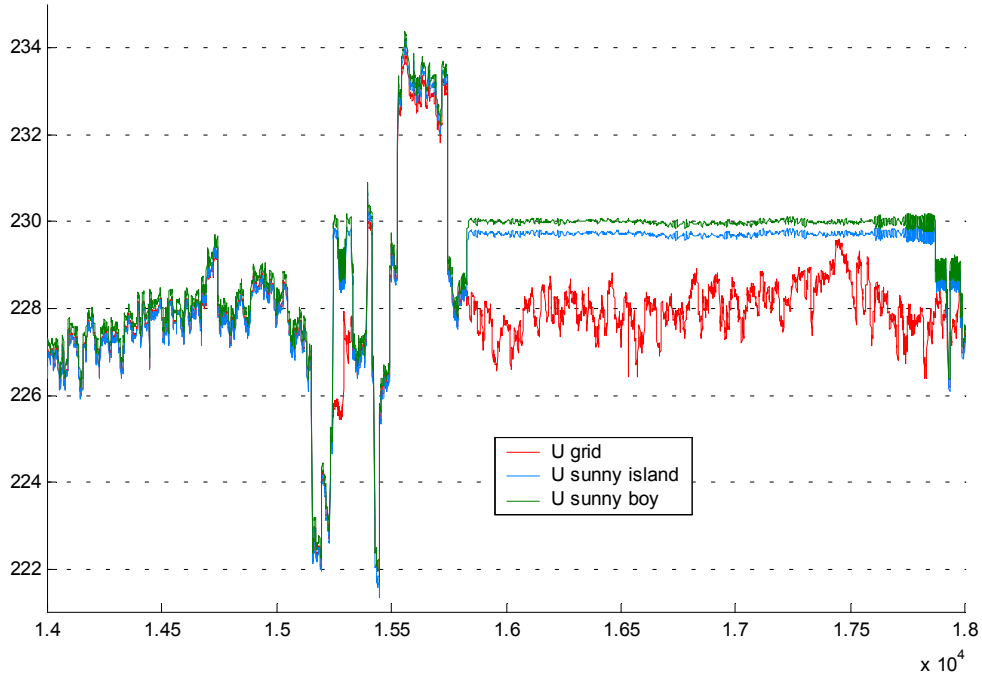
Οι τρεις καταγραφόμενες τάσεις: στο δίκτυο, στο sunny island και στο sunny boy. Αρχικά έχουμε συνδεδεμένη λειτουργία και γρήγορα αποσύνδεση του δικτύου. Η τάση του απομονωμένου μικροδικτύου, επανέρχεται στην ονομαστική που ορίζεται στον αντιστροφέα sunny island και βέβαια την ίδια τάση ακολουθεί και ο αντιστροφέας sunny boy. Διασυνδεδεμένη λειτουργία πραγματοποιείται στα χρονικά διαστήματα 2000-3000, 8000-11000 και 15000-18000. Τις χρονικές αυτές στιγμές οι δύο αντιστροφείς ακολουθούν συνεχώς την κυματομορφή του δικτύου.

Συχνότητα του δικτύου και του αντιστροφέα sunny island, το ίδιο χρονικό διάστημα της καταγραφής. Πιο καθαρά απεικονίζεται η διασυνδεδεμένη λειτουργία τις στιγμές 2000-3000, 8000-11000 και 15000-18000. Η συχνότητα του δικτύου παρουσιάζει διαρκεί κυμάτωση πολύ μικρού όμως εύρους, ενώ η συχνότητα του αντιστροφέα στη διασυνδεδεμένη λειτουργία προσπαθεί να την ακολουθήσει με μικρότερη κυμάτωση. Είναι εμφανείς οι μεγάλες αποκλίσεις στην συχνότητα που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της σύνδεσης – αποσύνδεσης σε επιτρεπτά όμως πλαίσια.

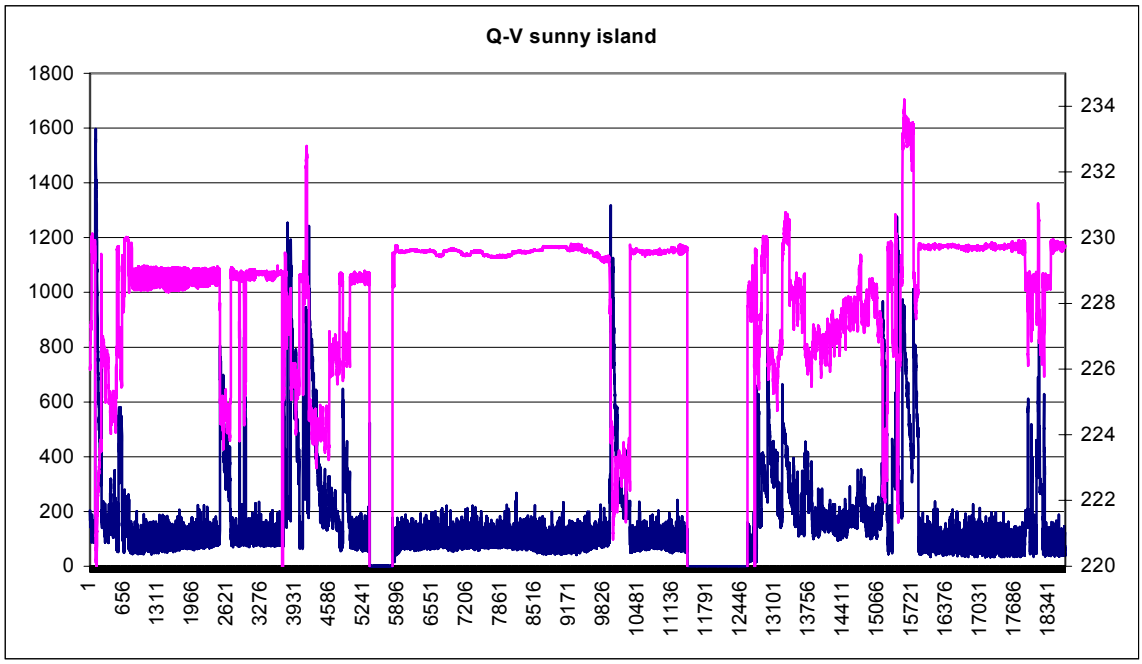


Κυματομορφές των συχνοτήτων για πιο μικρό διάστημα. Στο μέσο του γραφήματος η διασυνδεδεμένη λειτουργία. Είναι εμφανής η συμπεριφορά του αντιστροφέα, ο οποίος ακολουθεί την συχνότητα του δικτύου.

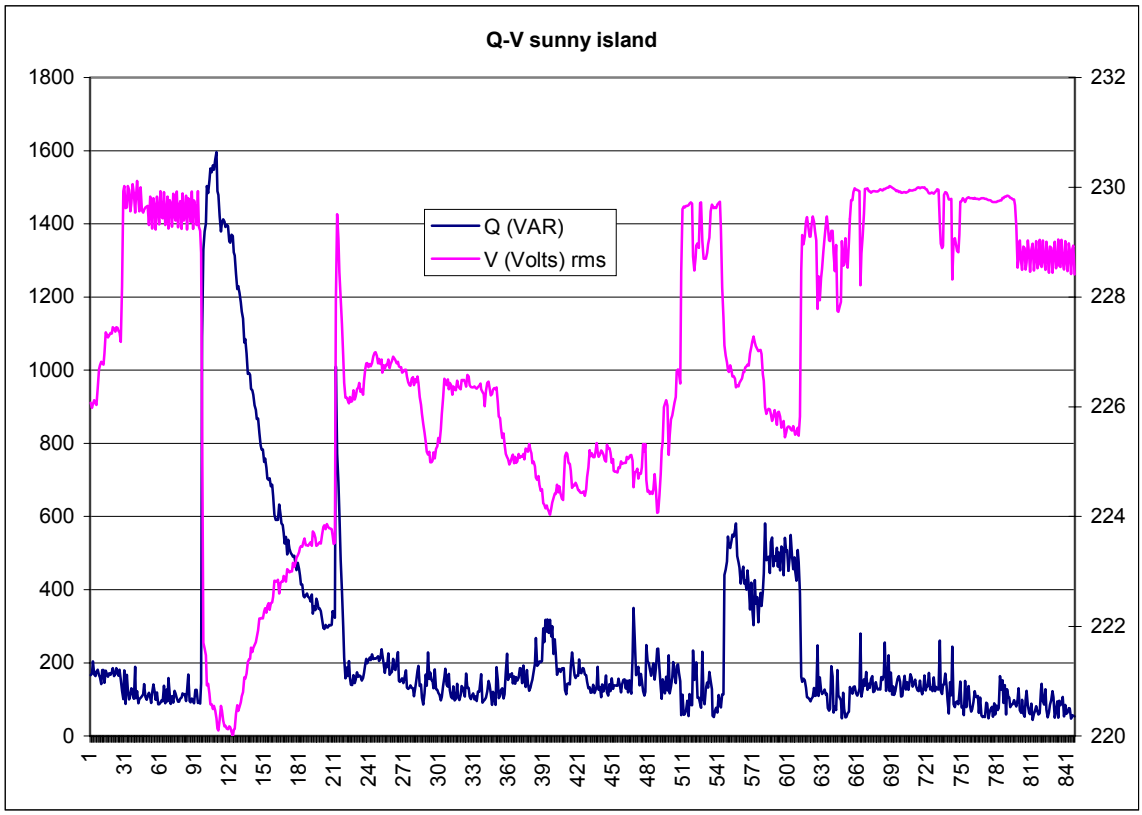
Δεύτερη λεπτομέρεια κατά τη διάρκεια άλλης σύνδεσης και αποσύνδεσης. Η συχνότητα του δικτύου παρουσιάζει μικρή κυμάτωση, ενώ ο αντιστροφέας ακολουθεί μια «μέση τιμή» αυτής.



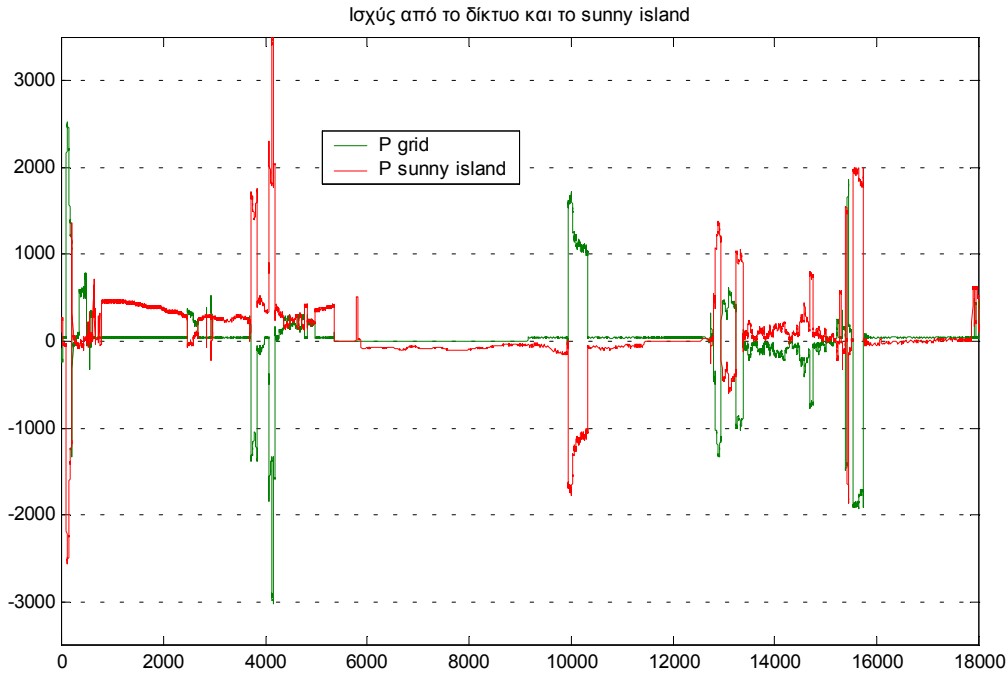
Λεπτομέρεια των τάσεων το ίδιο χρονικό διάστημα. Απόλυτη σύμπτωση κατά τη διάρκεια της διασυνδεδεμένης λειτουργίας.

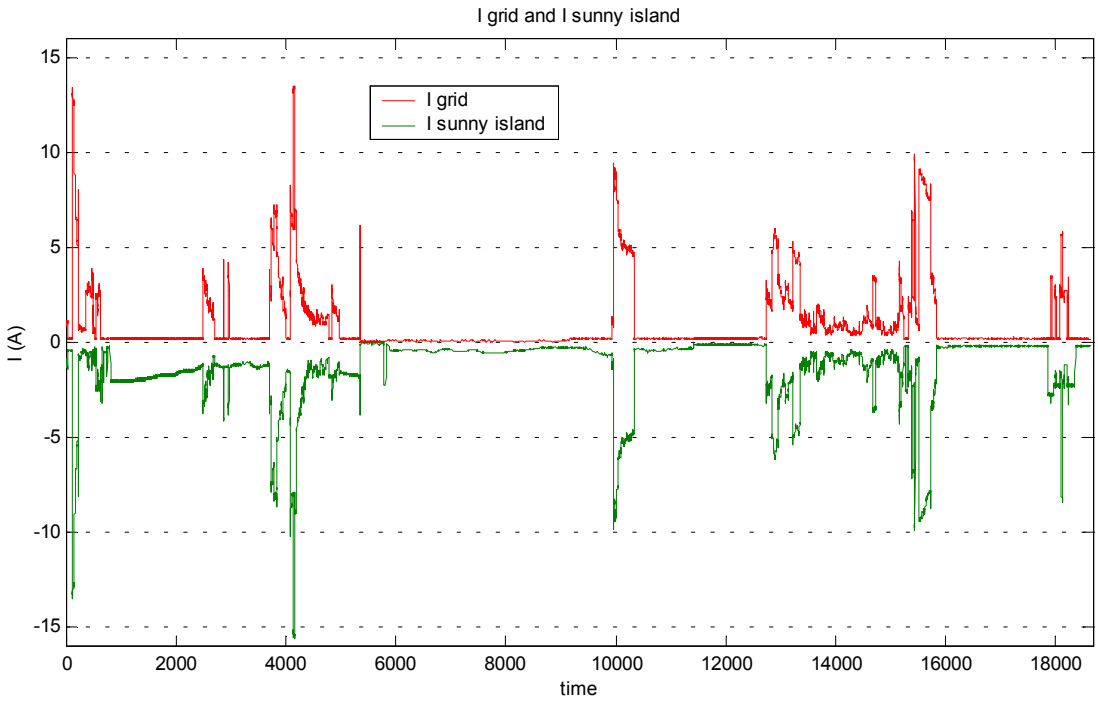


Γράφημα τάσεως και αέργου ισχύος του αντιστροφέα sunny island συναρτήσει του χρόνου, κατά τη διάρκεια της καταγραφής. Δεδομένης της αρνητικής κλίσης droopV, αύξηση της αέργου φορτίσεως (μπλε γραμμή) του αντιστροφέα προκαλεί μείωση της τάσεως εξόδου του (κόκκινη γραμμή).



Λεπτομέρεια του γραφήματος Q-V. Ακόμη πιο φανερή η επίδραση της αέργου φορτίσεως στην τάση του αντιστροφέα.

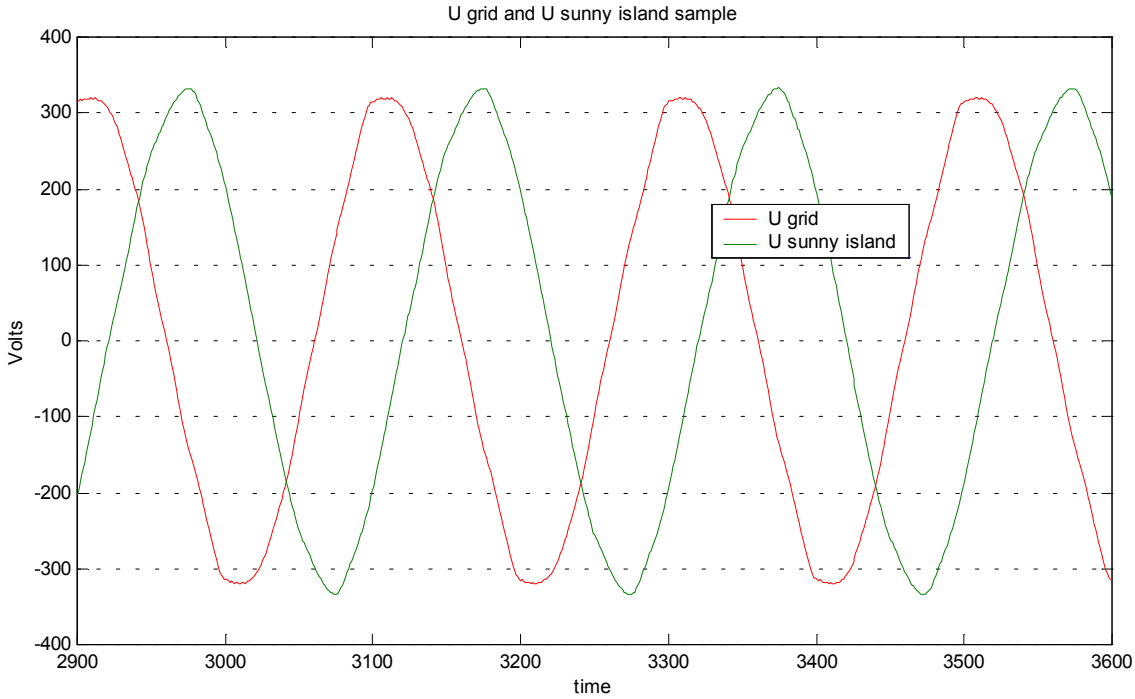




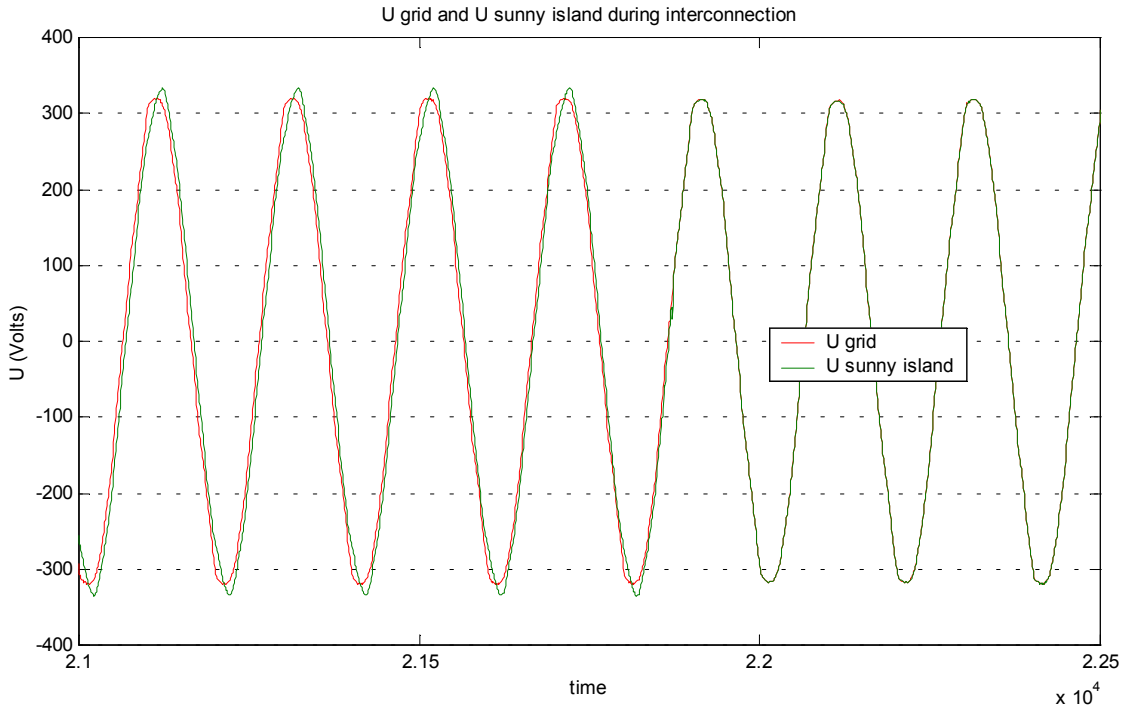
Ρεύμα δικτύου και sunny island το διάστημα της καταγραφής. Διακρίνονται στα διαστήματα της διασυνδεδεμένης λειτουργίας, όπου υπάρχει ανταλλαγή ρεύματος μεταξύ των δύο πηγών. Αντίθετα, σε μη διασυνδεδεμένη λειτουργία, ο αντιστροφέας απορροφά ρεύμα από τα φωτοβολταϊκά.

5.3.2 Μετρήσεις με γρήγορη δειγματοληψία

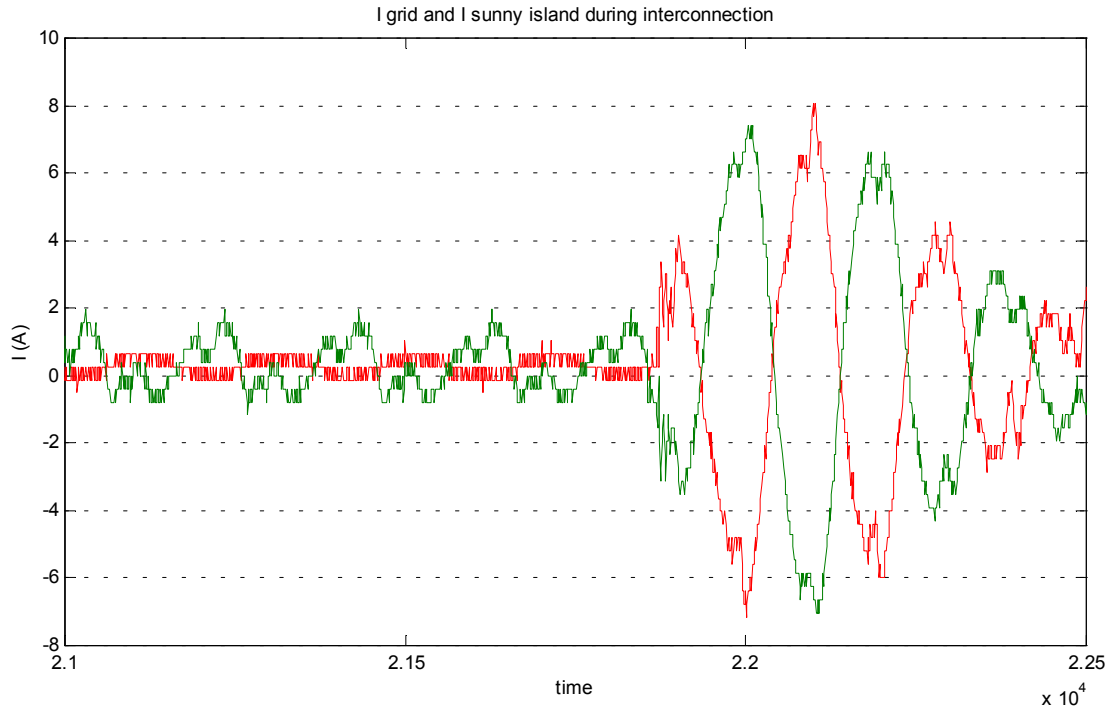
Οι παρακάτω μετρήσεις έγιναν ενώ το μικροδίκτυο ήταν σε σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο, με μεγάλη δειγματοληψία, και είναι μετρήσεις πραγματικών τιμών και όχι RMS. Οι μετρήσεις είχαν διάρκεια 10 δευτερόλεπτα στην διάρκεια των οποίων έγιναν 100.000 μετρήσεις.



Λεπτομέρεια από τις δύο κυματομορφές (δίκτυο και αντιστροφέας), σε μη διασυνδεδεμένη λειτουργία. Παρατηρείται κορεσμός στις κορυφές του ημιτόνου του δικτύου. Πλήρης ημιτονική κυματομορφή του αντιστροφέα.



Κυματομορφές των δύο τάσεων κατά τη διάρκεια της σύνδεσης. Η κυματομορφή του αντιστροφέα ολισθαίνει λίγο για να συμπέσει με αυτή του δικτύου. Η διαδικασία γίνεται χωρίς διαταραχή ή διακοπή



Τα ρεύματα του δικτύου και του αντιστροφέα το ίδιο διάστημα. Είναι εμφανής η στιγμή της σύνδεσης, όπου και αρχίζει η ροή ρεύματος από τη μία πηγή στην άλλη (ακριβώς αντίθετης κυματομορφής)

5.4 Μετρήσεις με τον αναλυτή χαρακτηριστικών ισχύος METREL PHS50

Για τις παρακάτω μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ο τριφασικός αναλυτής ισχύος Metrel PHS50, ο οποίος και παρέχει την δυνατότητα γρήγορης καταγραφής (μεγάλη δειγματοληψία), καταγραφής μεταβατικών φαινομένων, καταγραφής περιόδων και καταγραφής χαρακτηριστικών σύμφωνα με την προδιαγραφή EN50160. Ο συγκεκριμένος αναλυτής χρησιμοποιείται από τις ηλεκτρικές εταιρίες για την μέτρηση των χαρακτηριστικών της ποιότητας των ηλεκτρικών δικτύων.

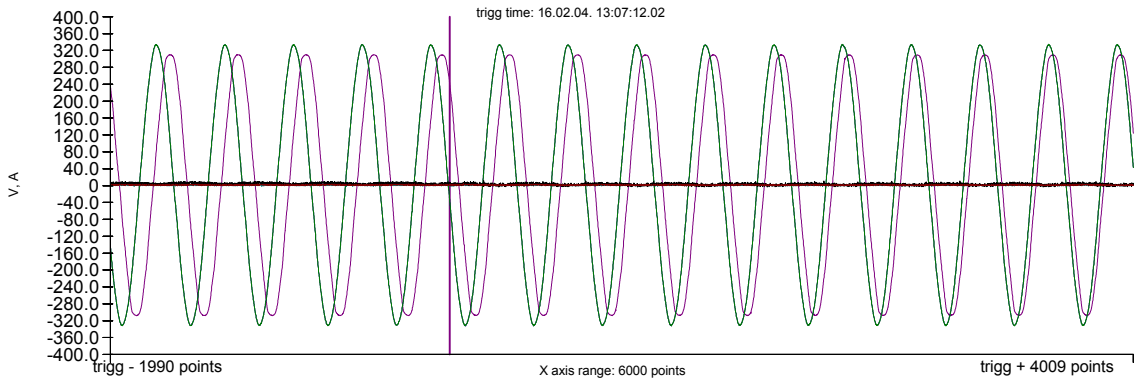
5.4.1 Μεταβατικά φαινόμενα (transients)

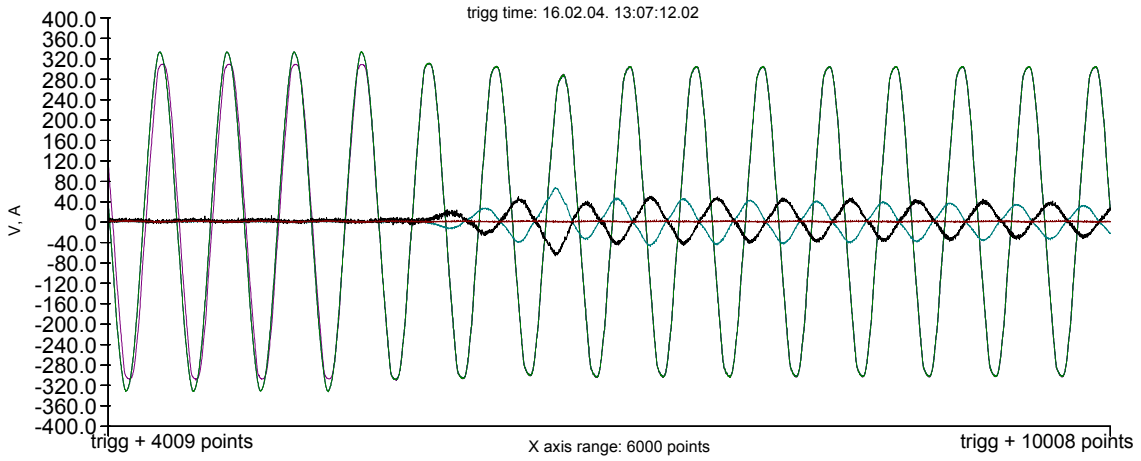
Κατά τις δοκιμές αυτές πραγματοποιούμε συνδέσεις – αποσυνδέσεις του αντιστροφέα sunny island με το κεντρικό δίκτυο με διαφορετικές ονομαστικές τιμές τάσης και συχνότητας, ώστε να φανεί η επίδραση αυτών τη στιγμή της σύνδεσης. Τονίζεται ότι η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη, γίνεται με εντολή στον αντιστροφέα, ο οποίος αφού πρώτα χρησιμοποιήσει ένα βρόγχο κλειδώματος φάσης, ενεργοποιεί τον μικροαυτόματο της σύνδεσης με το δίκτυο. Έτσι η μετάβαση γίνεται χωρίς καμία διακοπή ή διαταραχή στο ρεύμα του φορτίου.

Test 4. transients

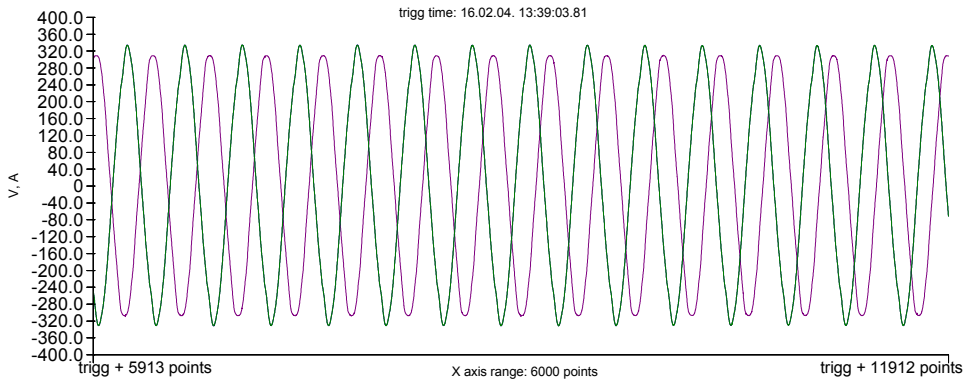
Στην δοκιμή αυτή καταγράφεται η μεταβατική κατάσταση σύνδεσης του sunny island με το δίκτυο. Για τον αντιστροφέα ορίζονται ως κανονικές τιμές συχνότητας και τάσης οι:

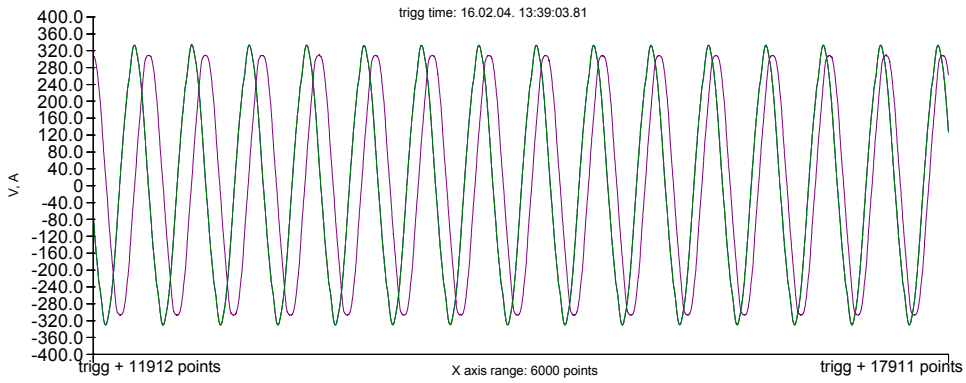
Fconv=49,4 Hz
Uconv= 233 V





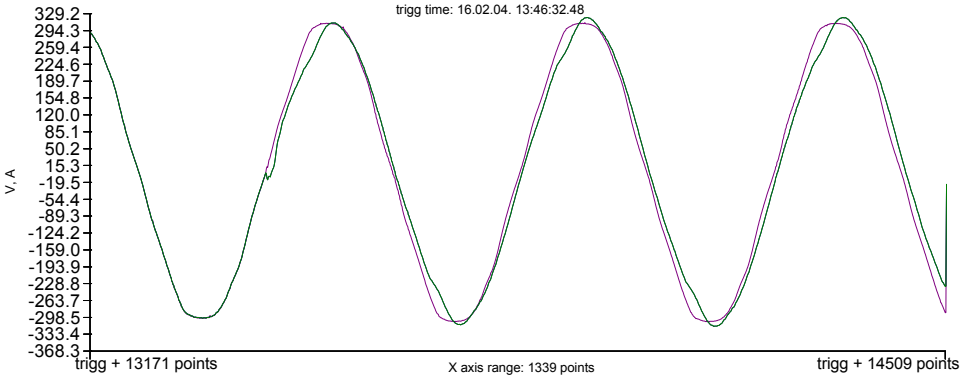
Test 5. Διασύνδεση sunny island με:
Fconv= 49,4 Hz
Vconv= 233 V





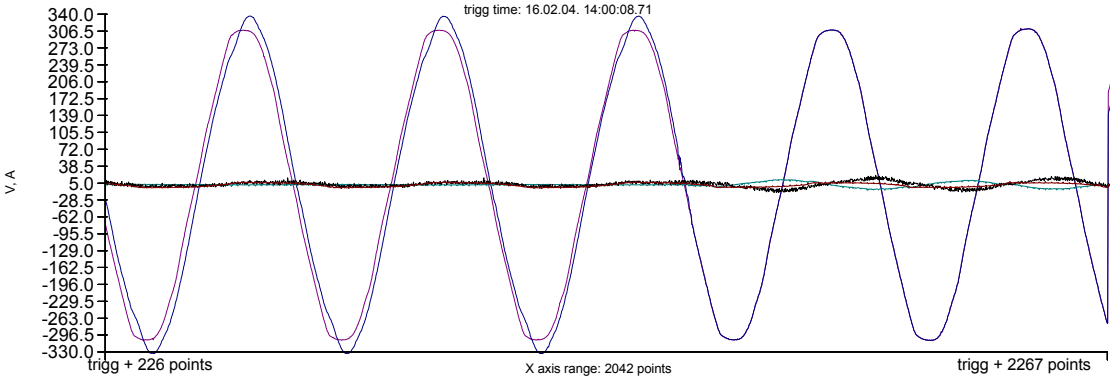
Από την στιγμή που δίνεται η εντολή μέσω software ή από την οθόνη του αντιστροφέα, περνάει ένα χρονικό διάστημα στο οποίο ο βρόγχος κλειδώματος φάσης ολισθαίνει κατάλληλα την κυματομορφή του αντιστροφέα ώστε να μηδενιστεί η διαφορά φάσης με το δίκτυο. Το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που δίνεται η εντολή μέχρι να πραγματοποιηθεί η σύνδεση εξαρτάται από τη διαφορά φάσης που εντοπίζεται την παρούσα στιγμή. Στα γραφήματα φαίνεται ξεκάθαρα η μεγάλη διαφορά φάσης που εντοπίζεται, οπότε απαιτούνται περίπου 30 κύκλοι (0,5sec) μέχρι να πραγματοποιηθεί η ζεύξη.

Test 7. Αποσύνδεση δικτύου από το sunny island.
Στην δοκιμή αυτή αποσυνδέεται το κεντρικό δίκτυο από το μικροδίκτυο, οπότε τα φορτία εξυπηρετεί μόνο ο αντιστροφέας sunny island.
Fconv= 49,4
Vconv= 233 V
I_{load}= 4 A

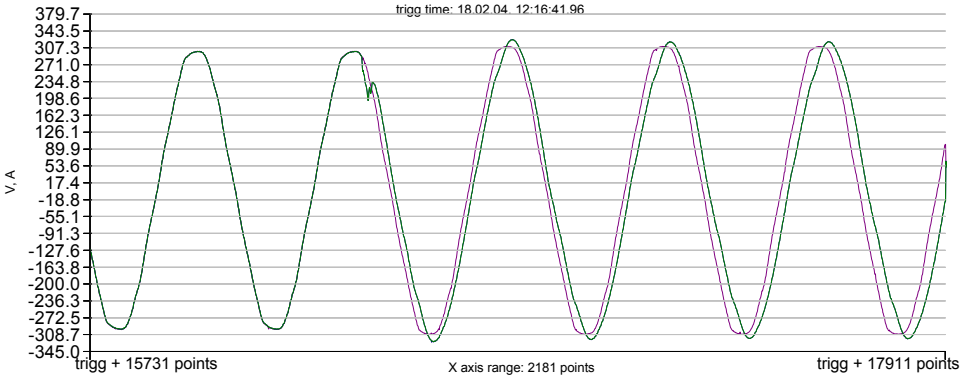


Λεπτομέρεια κατά την αποσύνδεση του δικτύου. Η τάση του φορτίου (συμπίπτει με την τάση του αντιστροφέα) είναι ελαφρώς παραμορφωμένη.

Test 10. Σύνδεση δικτύου στο μικροδίκτυο
Fconv= 50,5 Hz

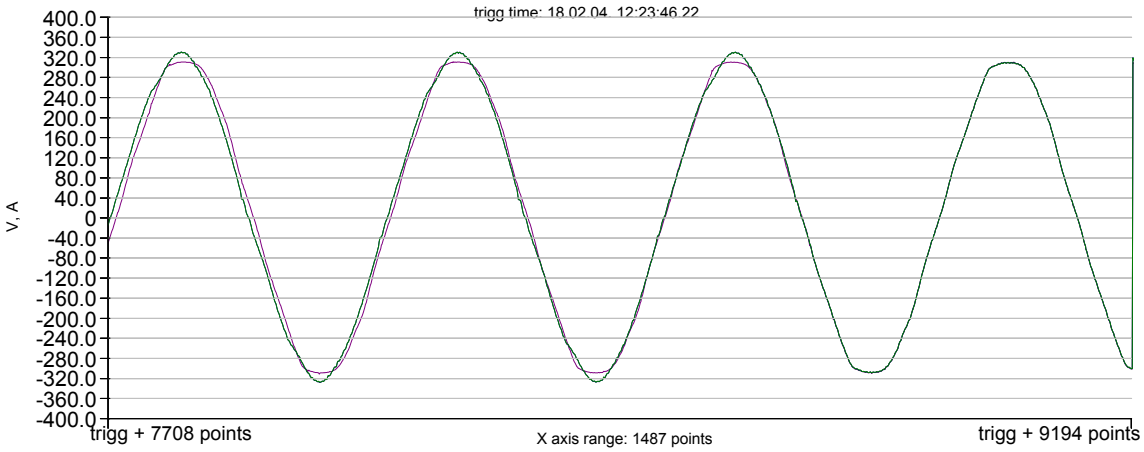


Test 12. Αποσύνδεση δικτύου
Fconv= 49,5 Hz
Vconv= 233 V



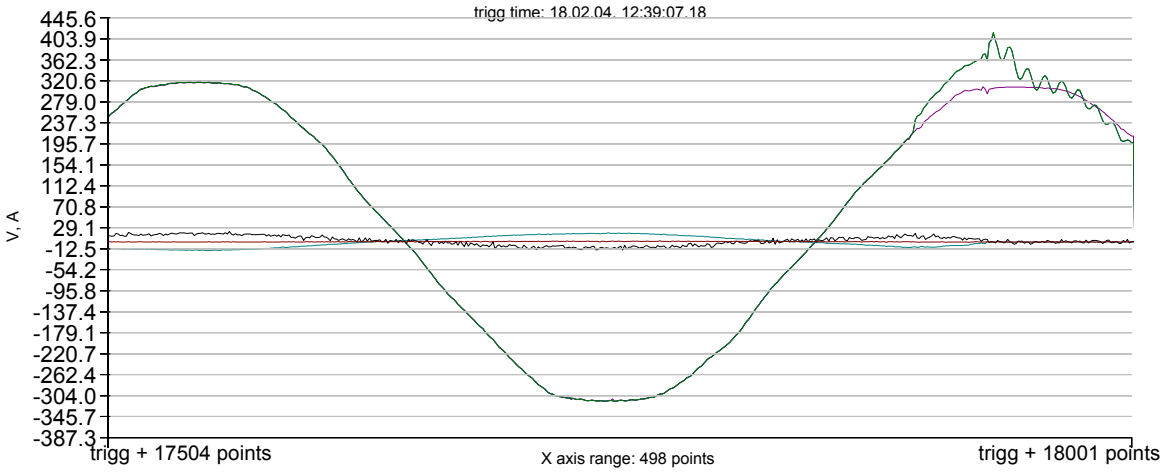
Αποσύνδεση δικτύου από τον αντιστροφέα. Μια ανεπαίσθητη μεταβολή της τάσης παρατηρείται (βύθιση κατά 89 volts).

Test 13. Σύνδεση δικτύου
Fconv= 49,5 Hz
Vconv= 233 V



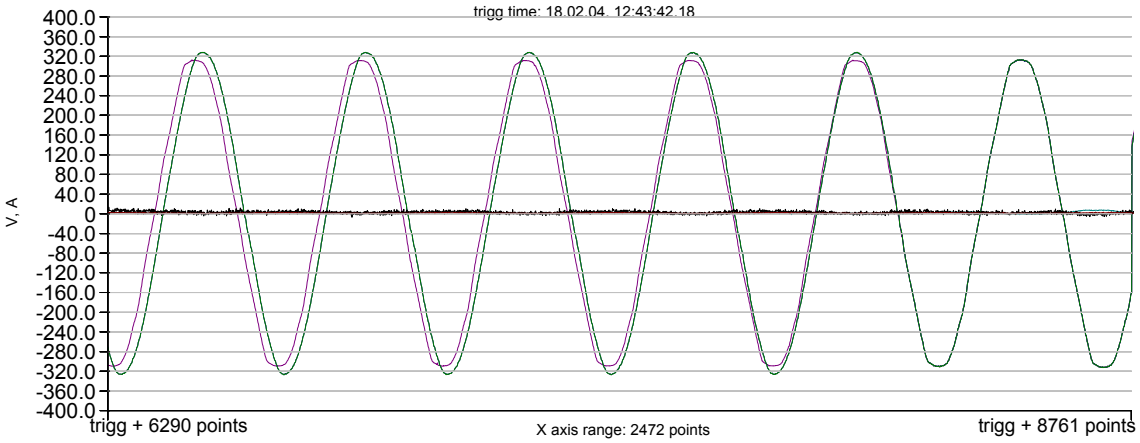
Σύνδεση δικτύου στο μικροδίκτυο. Η κυματομορφή του δικτύου είναι αυτή που καθορίζει την τελική κυματομορφή.

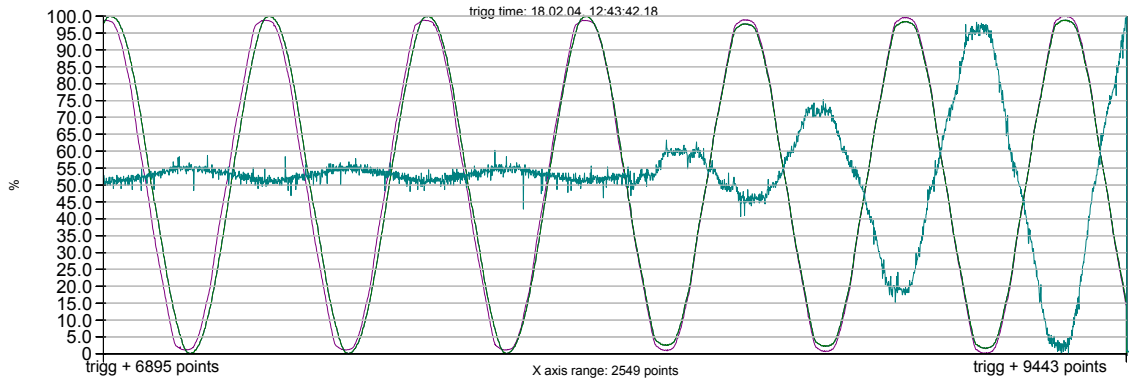
Test 14. Αποσύνδεση δικτύου παρουσία φορτίων
Fconv= 50,7 Hz
Vconv= 233 V



Μικρή υπέρταση κατά τη στιγμή της αποσύνδεσης (84 volts)

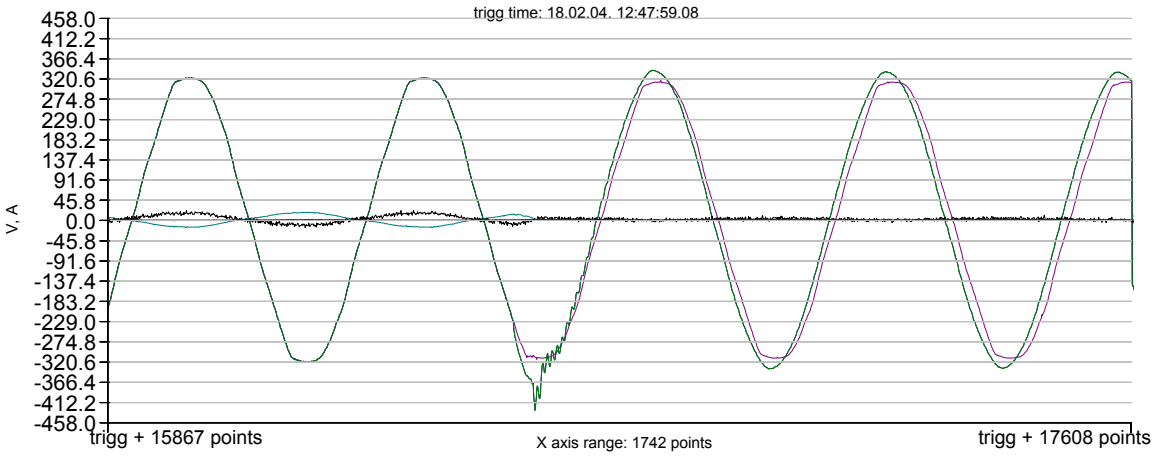
Test 15. Σύνδεση δικτύου
Fconv= 50,7 Hz
Vconv= 233 V





Σύνδεση του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο χωρίς καμία διαταραχή. Ρεύμα από το δίκτυο αρχίζει να ρέει αμέσως μετά τη σύνδεση

Test 16. Αποσύνδεση δικτύου απουσία φορτίων
Fconv= 50,7 Hz
Vconv= 233 V

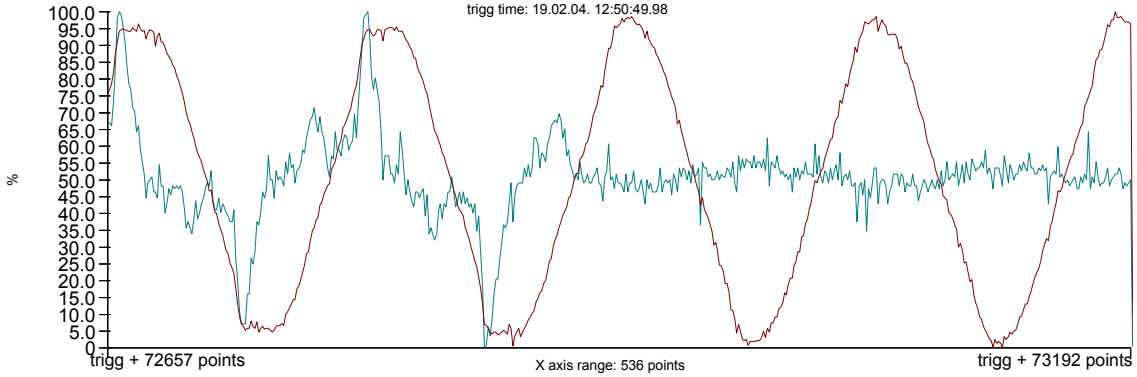


Εμφάνιση μικρής υπέρτασης 95 volt κατά τη στιγμή της αποσύνδεσης του δικτύου απουσία φορτίων στο μικροδίκτυο.

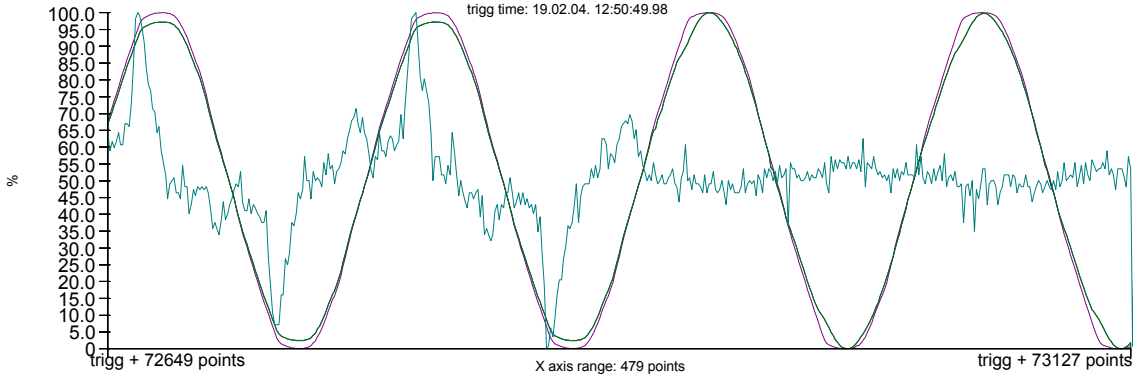
5.4.2 Περιοδικές μετρήσεις με διάφορους τύπους φορτίων

Με τον καταγραφέα Metrel πραγματοποιούμε περιοδικές μετρήσεις τάξεως λεπτών. (Κάθε μέτρηση χρησιμοποιεί δειγματοληψία 128 δείγματα/περίοδο, 1sec=50 περίοδοι)

Test 25. Αποσύνδεση δικτύου παρουσία φορτίων

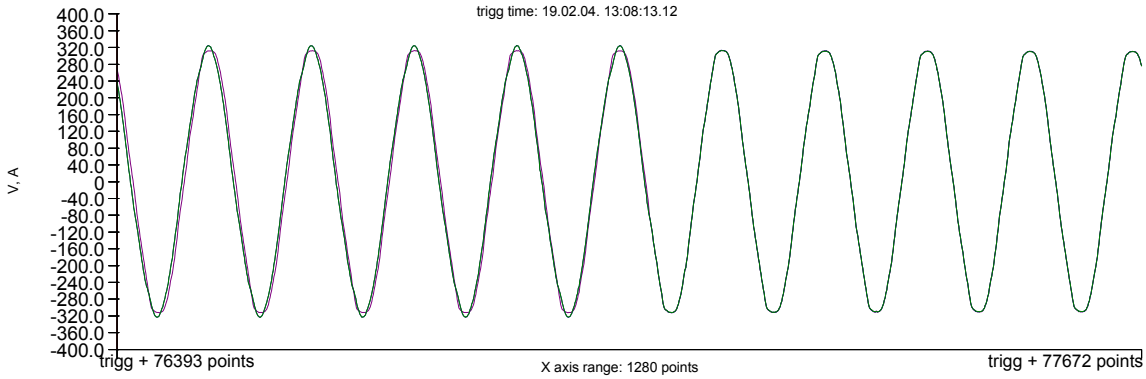


Κυματομορφές εντάσεως από το δίκτυο (μπλέ γραμμή), στο φορτίο (κόκκινη γραμμή) την στιγμή της αποσύνδεσης. Καμία διακοπή της τροφοδοτήσεως

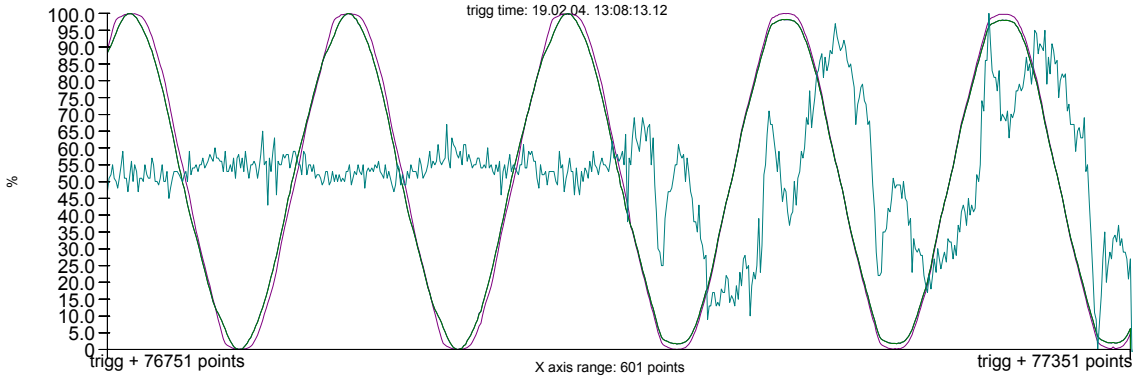


Κυματομορφές τάσης στο δίκτυο και στον αντιστροφέα κατά τη στιγμή της αποσύνδεσης. Εικονίζεται και η κυματομορφή της έντασης του δικτύου, η οποία και μηδενίζεται κατά την απόζευξη.

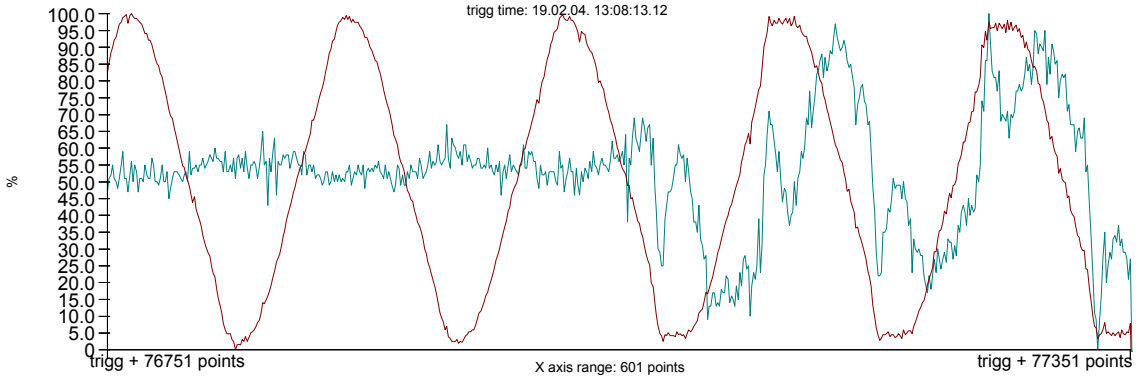
Test 26



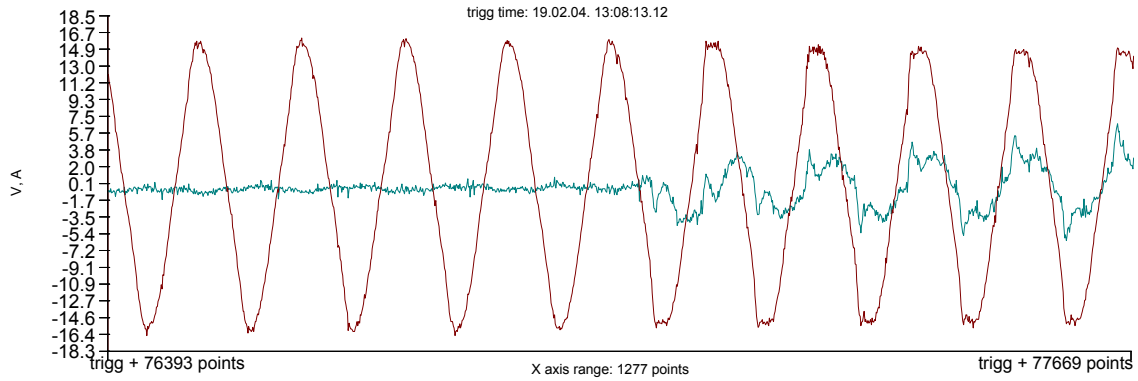
Επιτυχής σύνδεση του κεντρικού δικτύου με το μικροδίκτυο.



Ημιτονική κυματομορφή της τάσης του δικτύου και του αντιστροφέα (και φορτίου) τη στιγμή της σύνδεσης. Εμφανίζεται επίσης και η ένταση του δικτύου για να φανεί η ακριβής στιγμή της σύνδεσης. Δεν παρατηρείται καμία διαταραχή στην τάση.



Ένταση φορτίου (κόκκινη γραμμή) και δικτύου κατά τη στιγμή της σύνδεσης. Δεν παρατηρείται καμία διακοπή στο ρεύμα του φορτίου.



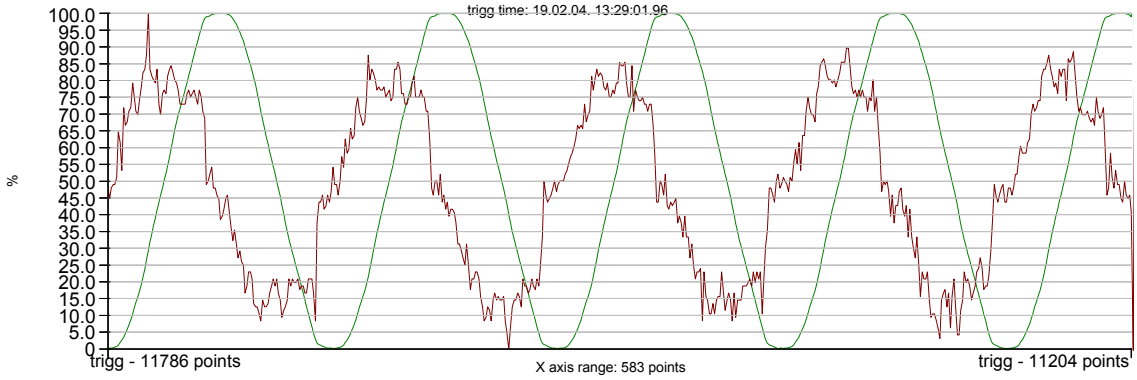
Ρεύμα στο φορτίο (κόκκινη γραμμή) και στη γραμμή του κεντρικού δικτύου (μπλε γραμμή) τη στιγμή της σύνδεσης. Είναι εμφανής μια μικρή παραμόρφωση που εισάγεται μετά την σύνδεση του κεντρικού δικτύου με το μικροδίκτυο.

Αρμονικές στο ρεύμα του φορτίου
Πριν την σύνδεση με το δίκτυο:
I3 proc= 4,5
I3 value= 0,5
I5 proc= 2,8

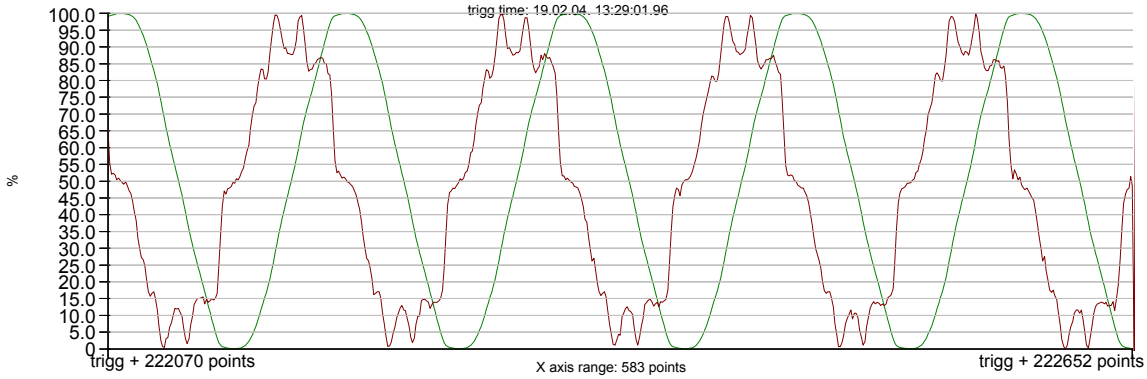
I5 value= 0,3

Μετά τη σύνδεση με το δίκτυο:
I3 proc= 4,4
I3 value= 0,5
I5 proc= 4,7
I5 value= 0,5

Test 27. Χωρητικά φορτία, αυτόνομη λειτουργία
Σταδιακή σύνδεση 6 πυκνωτών παράλληλα



Τάση και ένταση στο φορτίο με ένα πυκνωτή. Εμφανής η διαφορά φάσης τάσης – έντασης και η παραμόρφωση στο ρεύμα του φορτίου.



Τάση και ένταση (κανονικοποιημένες τιμές) στο φορτίο παρουσία έξι πυκνωτών (600VAR). Εμφανής η παραμόρφωση στην κυματομορφή του ρεύματος του φορτίου, καθώς και η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο μεγεθών. Ωστόσο η κυματομορφή της τάσης παραμένει ημιτονοειδής.

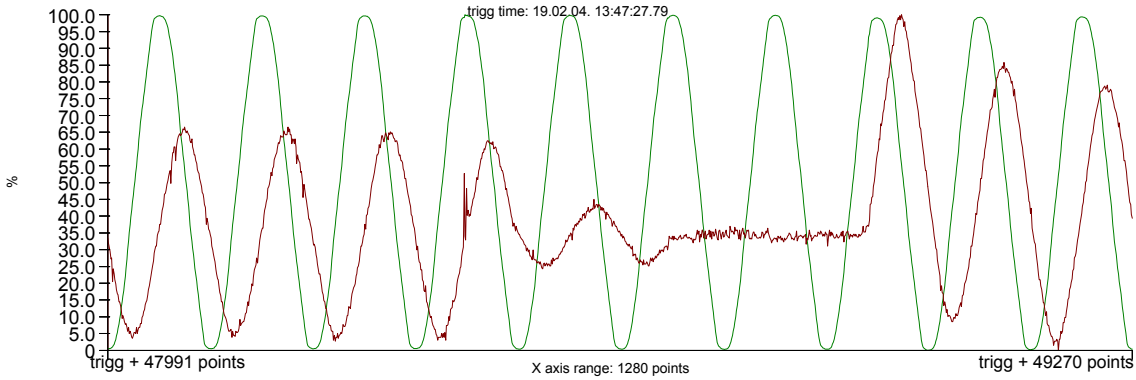
Αρμονικές ρεύματος

Με ένα πυκνωτή
THD I= 20,9%
THD V= 2,4%

Παρουσία και των 6 πυκνωτών
I3 proc= 2,1 value= 0,3
I5 proc= 9,6 value= 1,2

I7 proc= 7 value= 0,7
I9 proc=10,6 value= 1,4
THD I= 17,1%
THD V= 2,4%

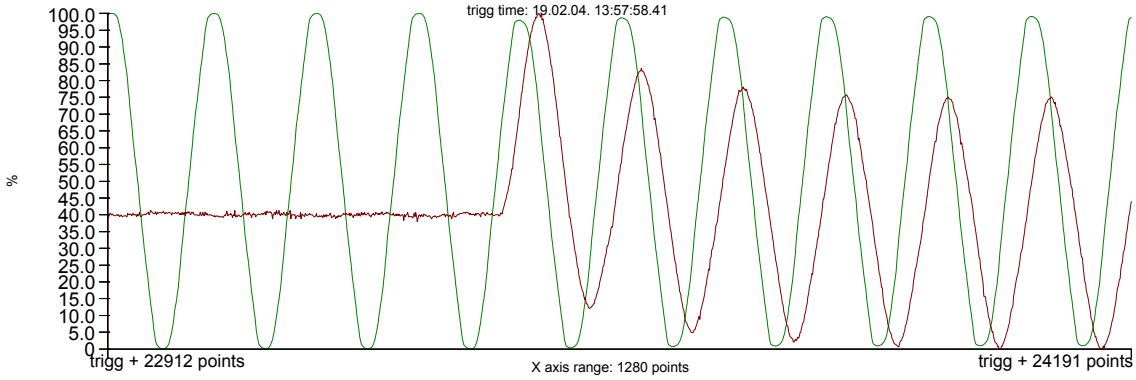
Test 28. Αυτόνομη λειτουργία με επαγωγικό φορτίο μόνο
Σύνδεση δύο πηνίων παράλληλα



Κυματομορφές τάσης – έντασης στα πηνία (κανονικοποιημένες). Αντίθετα με τα χωρητικά φορτία η κυματομορφή της έντασης δεν είναι παραμορφωμένη. Εμφανής είναι η διαφορά φάσης τάσης – έντασης.

THD I= 4,9%
THD V= 2,3%

Test 29. Αυτόνομη λειτουργία με επαγωγικό φορτίο
Σύνδεση τριών πηνίων παράλληλα

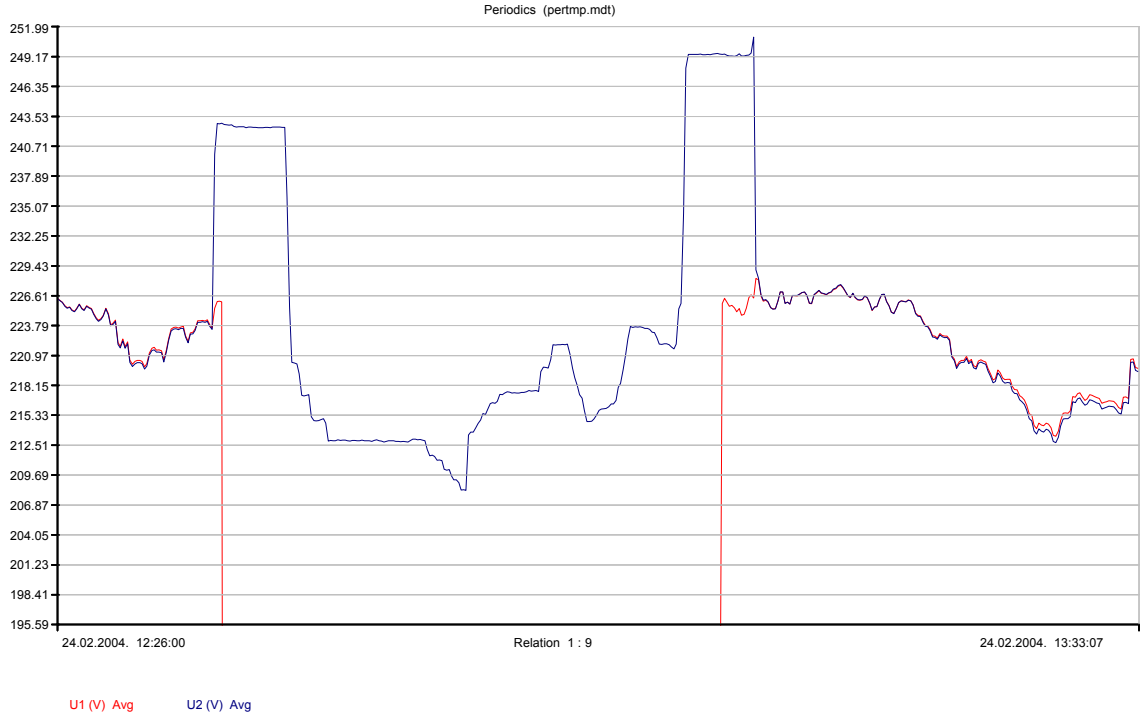


Κυματομορφές τάσης – έντασης παρουσία τριών αυτεπαγωγών (κανονικοποιημένες). Υστέρηση της κυματομορφής του ρεύματος έναντι της τάσης (η τάση προηγείται του ρεύματος)

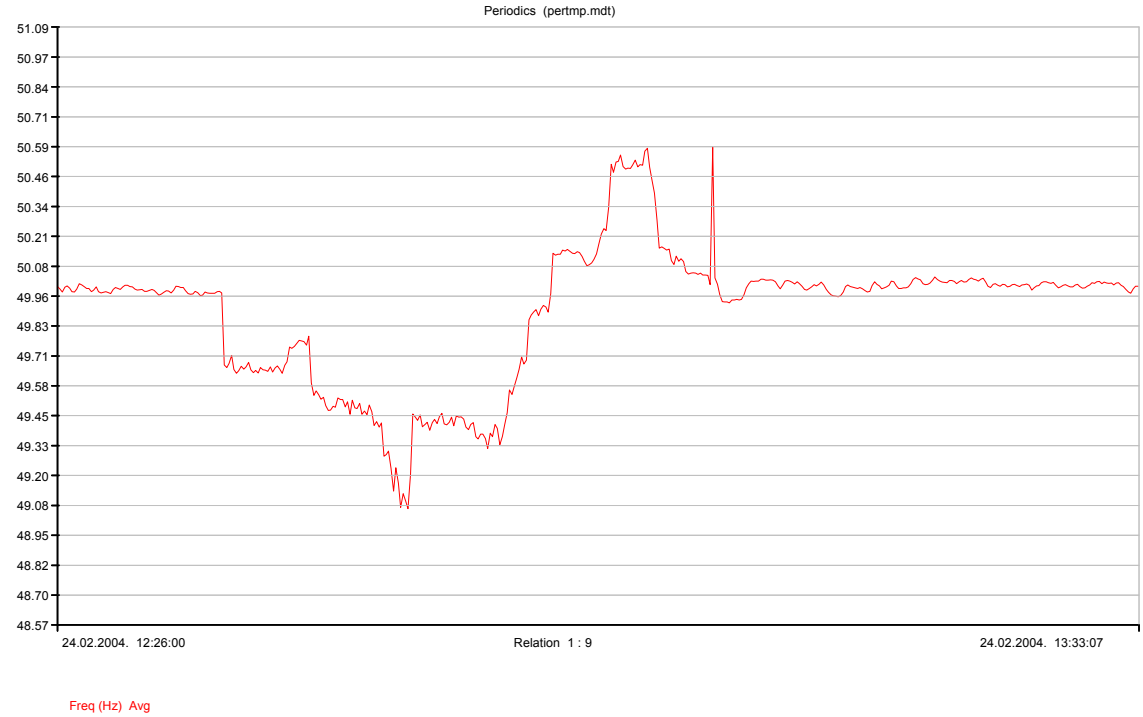
THD I= 4%
THD V= 2,4%

5.4.3 Περιοδική μέτρηση σύνδεσης – αποσύνδεσης του δικτύου

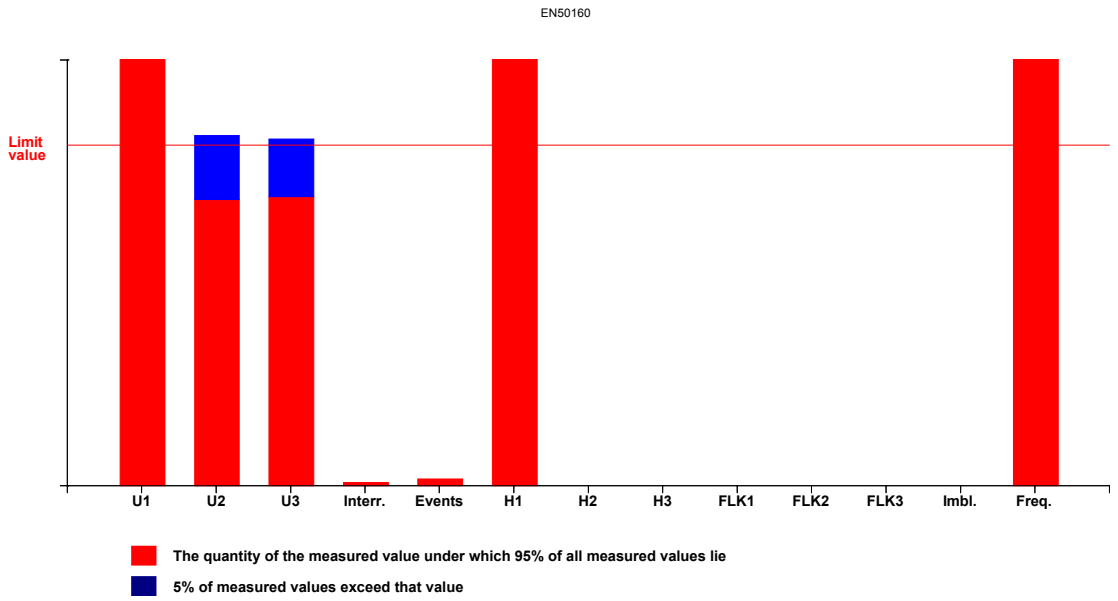
Test 34. Λειτουργία με δίκτυο, αποσύνδεση και επανασύνδεση
F_0= 50 Hz
V_0= 220 V



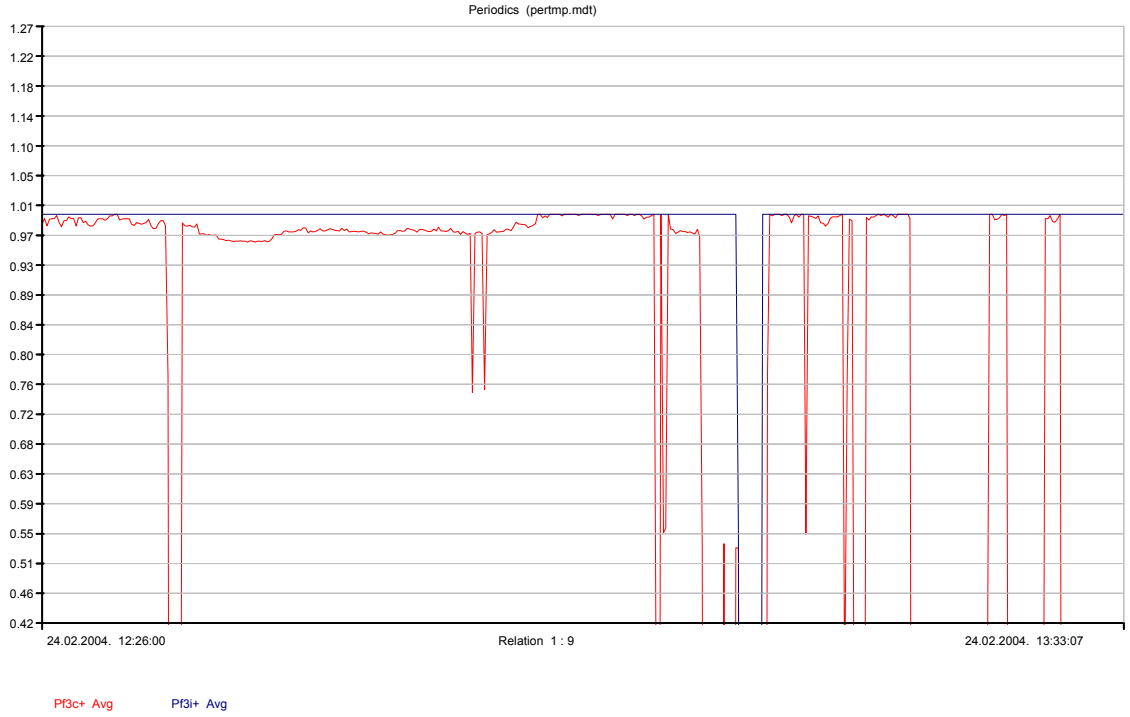
Τάση στο δίκτυο (κόκκινη γραμμή) και στο sunny island (μπλε γραμμή). Κατά τη στιγμή της απόζευξης και της ζεύξης παρατηρείται μία μικρή υπέρταση στην τάση του αντιστροφέα



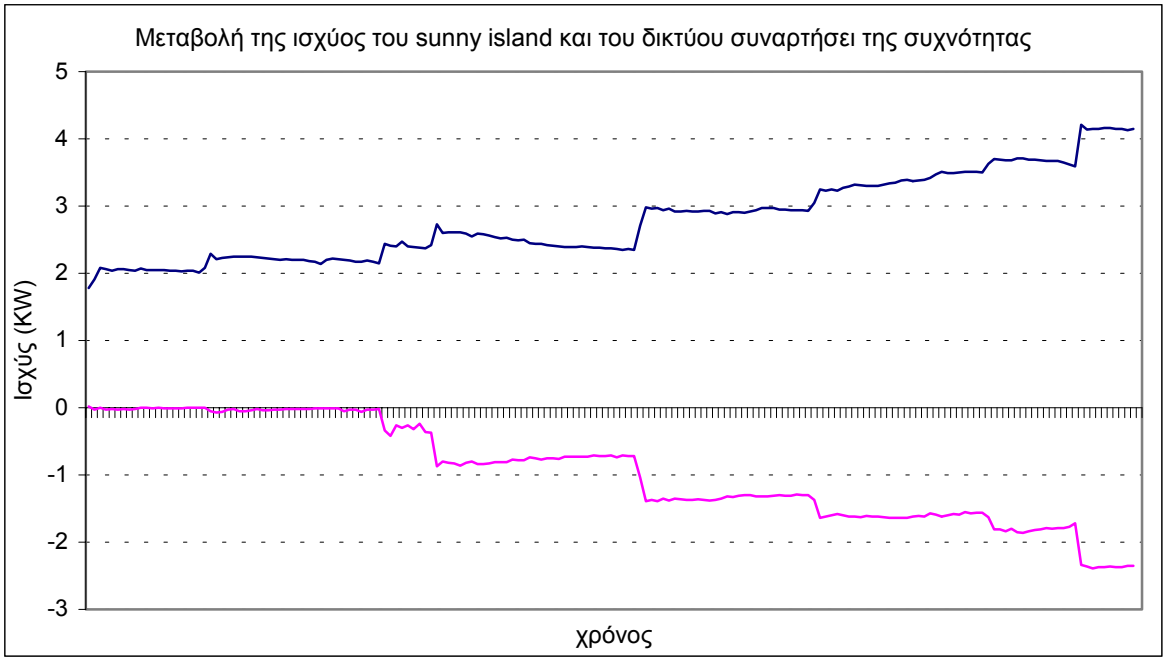
Συχνότητα στο διάστημα των μετρήσεων. Με συχνότητα κανονικής λειτουργίας τα 50 Hz, μικρή υπέρβαση του ορίου των 0,5Hz παρατηρείται μόνο κατά τη στιγμή της επανασύνδεσης



Στατιστικά κατά EN50160 για τις τρεις μετρούμενες τάσεις, U1:grid, U2:sunny island, U3:sunny boy καθώς και για τις αρμονικές τους. Το κόκκινο τμήμα της ράβδου αντιστοιχεί στην ποσότητα του μεγέθους που βρέθηκε στο 95% των τιμών. Το μπλε τμήμα αντιστοιχεί στο υπόλοιπο 5% των μετρηθέντων τιμών



Συντελεστής ισχύος του sunny boy. Κόκκινη γραμμή χωρητικός συντελεστής ισχύος, μπλε γραμμή: επαγωγικός συντελεστής ισχύος



Πείραμα με διασυνδεδεμένη λειτουργία του sunny island στο κεντρικό δίκτυο (οπότε και η συχνότητα του όλου συστήματος παραμένει σταθερή στην αυτή του δικτύου 50 Hz). Το φορτίο παραμένει σταθερό ενώ αυτό που αλλάζει είναι η συχνότητα κανονικής λειτουργίας του αντιστροφέα. Αρχικά, με συχνότητα μόλις λίγο πάνω από του δικτύου (50,1 Hz) ο αντιστροφέας δίνει ελάχιστη ενεργό ισχύ. Η συχνότητα ρυθμίζεται σταδιακά στα 50, 49.8, 49.7, 49,6 και 49,4 Hz. Καθώς οι τιμές αυτές είναι μικρότερες από αυτές του δικτύου, ο αντιστροφέας απορροφά ενεργό ισχύ σύμφωνα με την εξίσωση που καθορίζει την ενεργό του ισχύ $P = \frac{(f_0 - f) \cdot Pnom}{droopf}$**. Η ισχύς που απορροφάται από τον αντιστροφέα (κόκκινη γραμμή), δεδομένης της σταθερής κατανάλωσης στο φορτίο και της παραγωγής από τα φωτοβολταϊκά, παρέχεται από το δίκτυο (μπλε γραμμή).**

5.4.4 Περιοδικές μετρήσεις απομονωμένης λειτουργίας. Μετρήσεις των χαρακτηριστικών καμπύλων στατισμού του αντιστροφέα sunny island.

Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών καμπύλων στατισμού P-f, Q-V, όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις που πάρθηκαν από τον καταγραφέα metrel. Με σημάδια παρουσιάζονται οι πραγματικές τιμές της ισχύος που καταγράφεται, ενώ με ροζ γραμμή φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες στατισμού όπως προκύπτουν από τις δύο εξισώσεις:

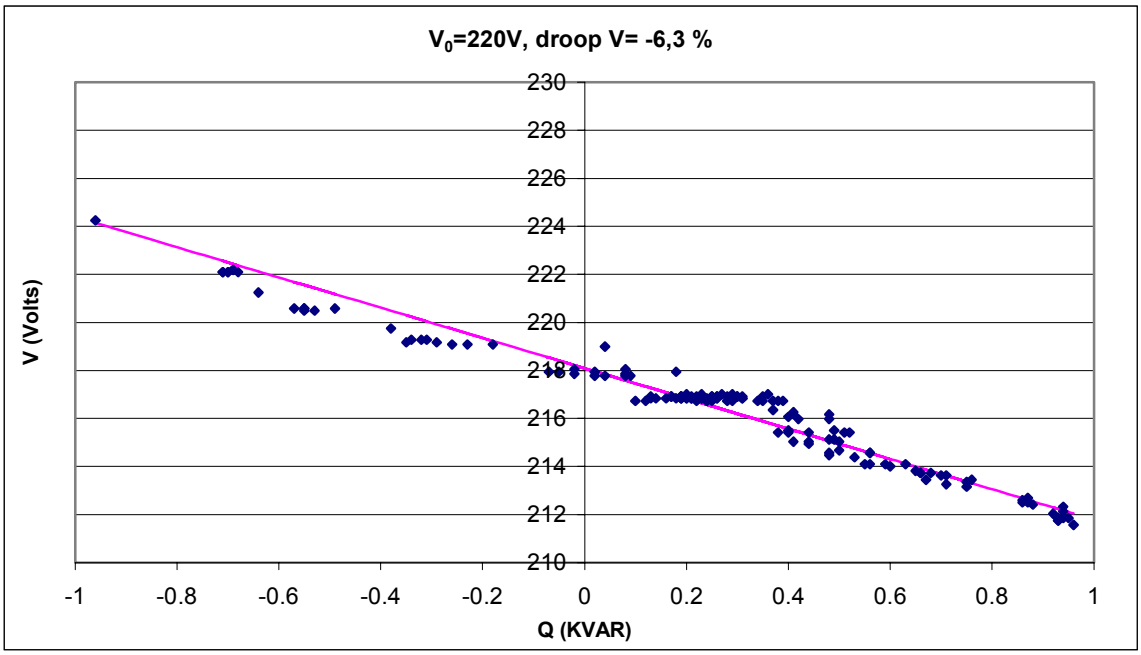
$$f = f_0 - (Droopf / P_{nom}) \cdot P$$

$$V = V_0 - \left((DroopV(\% \cdot V_{nom})) / Q_{nom}\right) \cdot Q$$

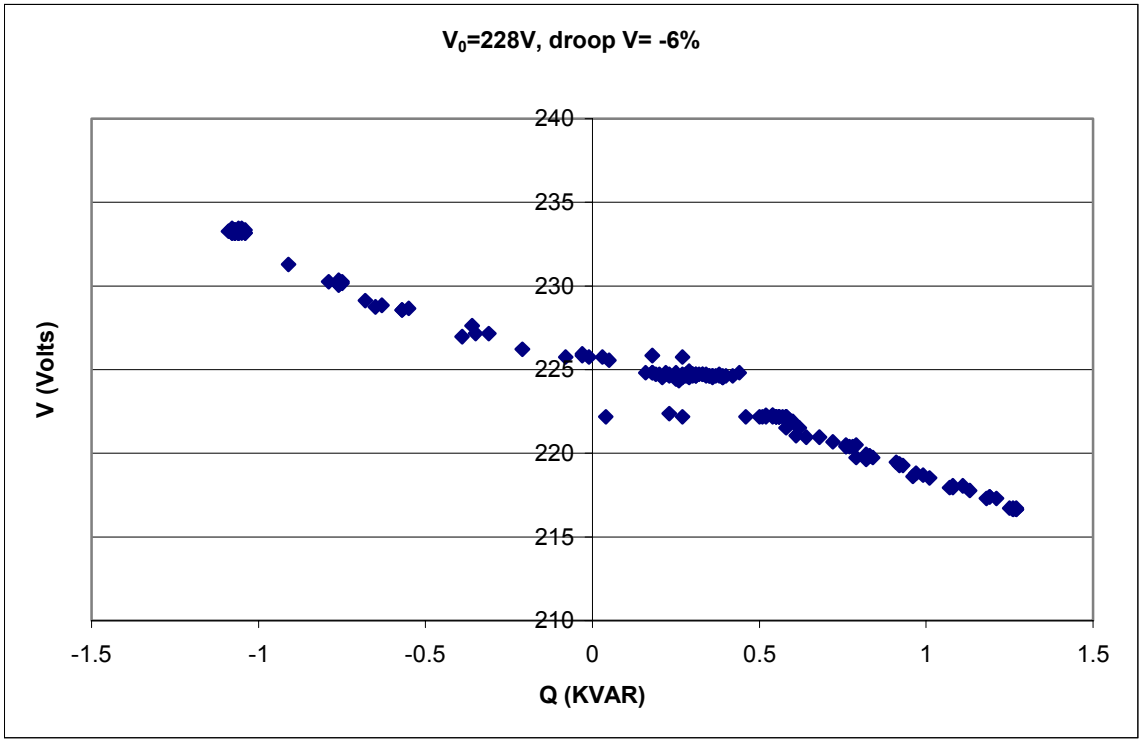
Test 36. Αυτόνομη λειτουργία

V_0=220V

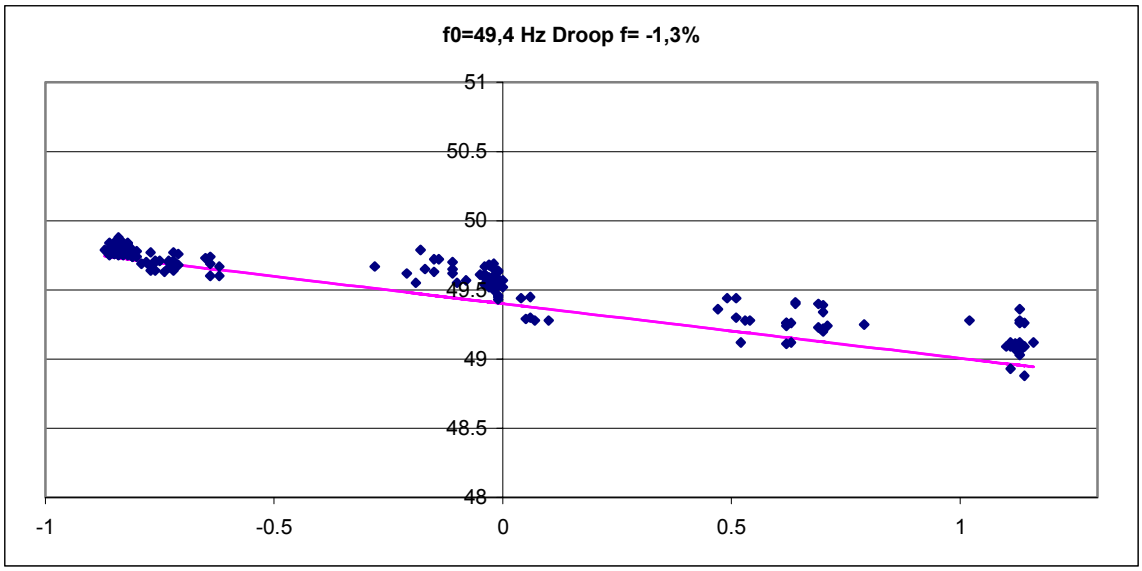
Droop V=-6,3%



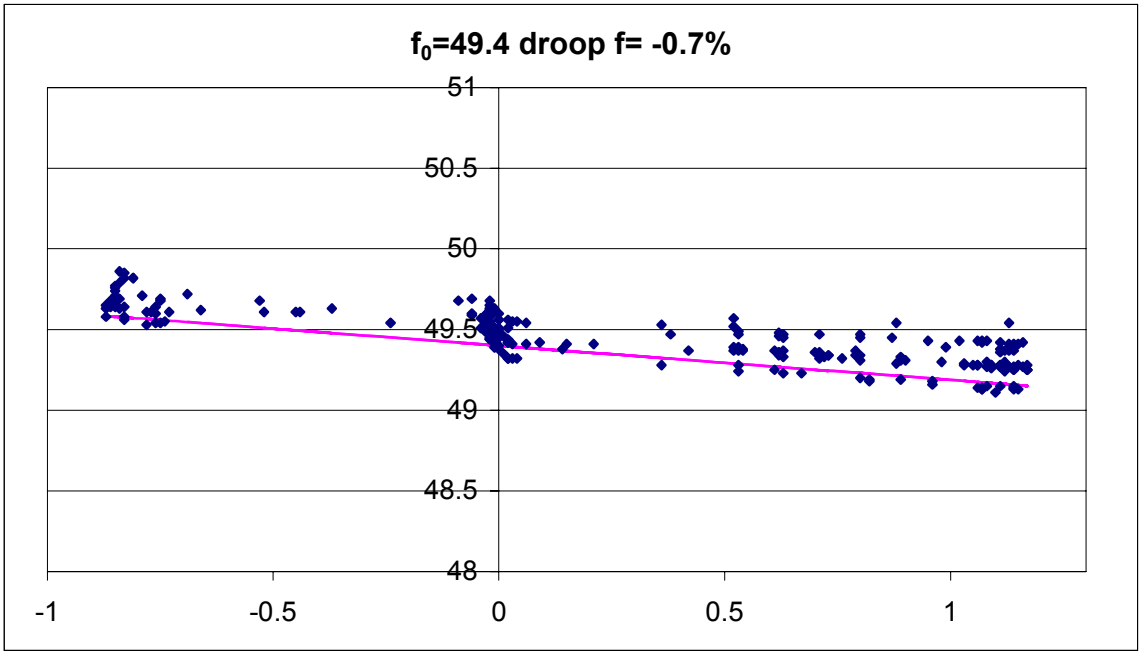
Πειραματικές μετρήσεις και θεωρητική καμπύλη στατισμού τάσης του αντιστροφέα sunny island

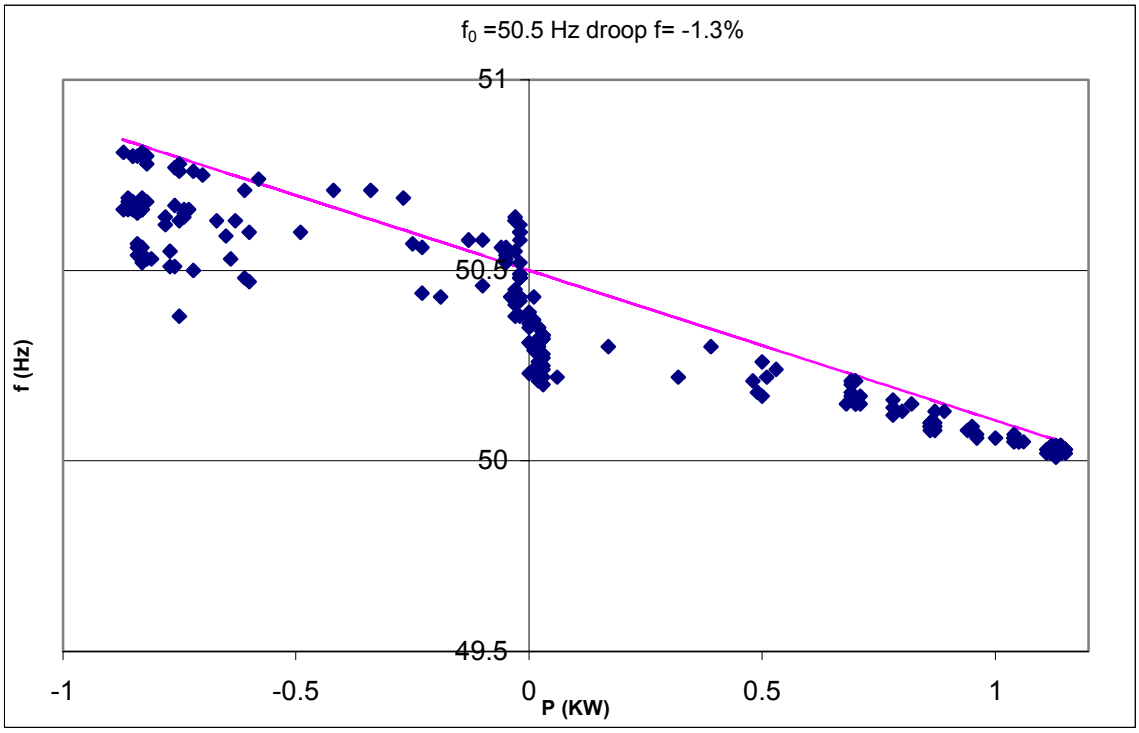


Test 37. Αυτόνομη λειτουργία μικροδικτύου

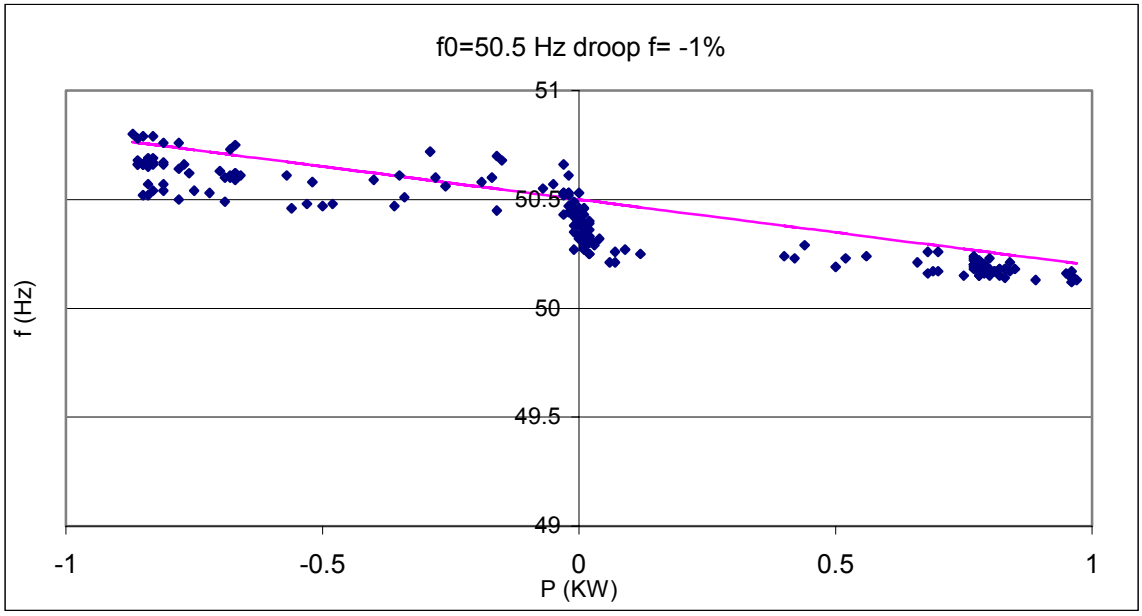


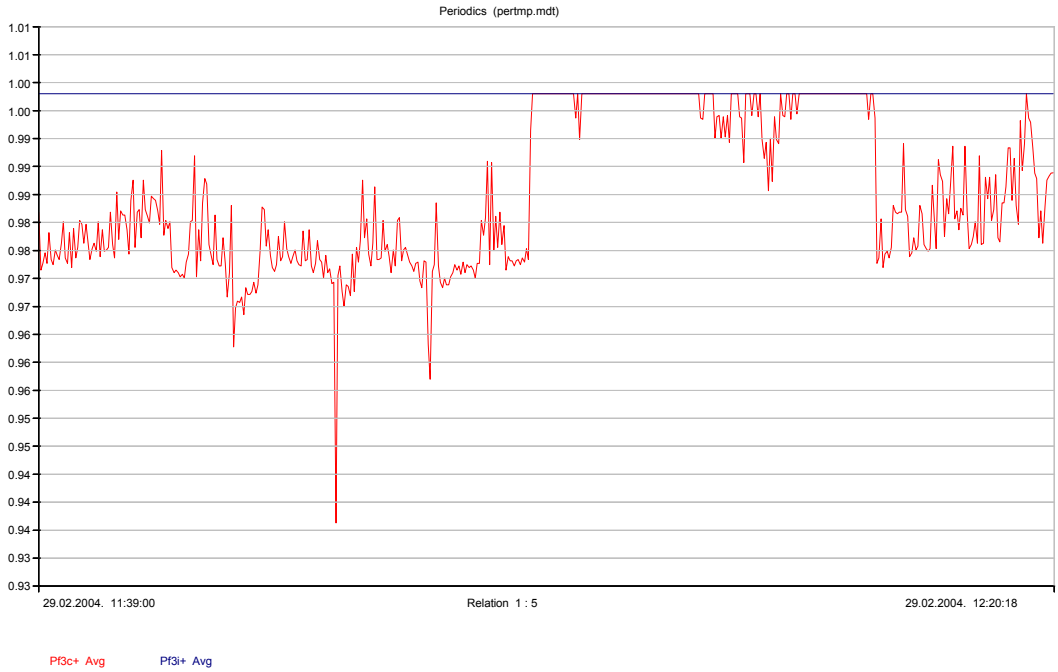
Πειραματικές μετρήσεις και θεωρητική καμπύλη $f = 49.4 - (1.3/3.3) \cdot P$



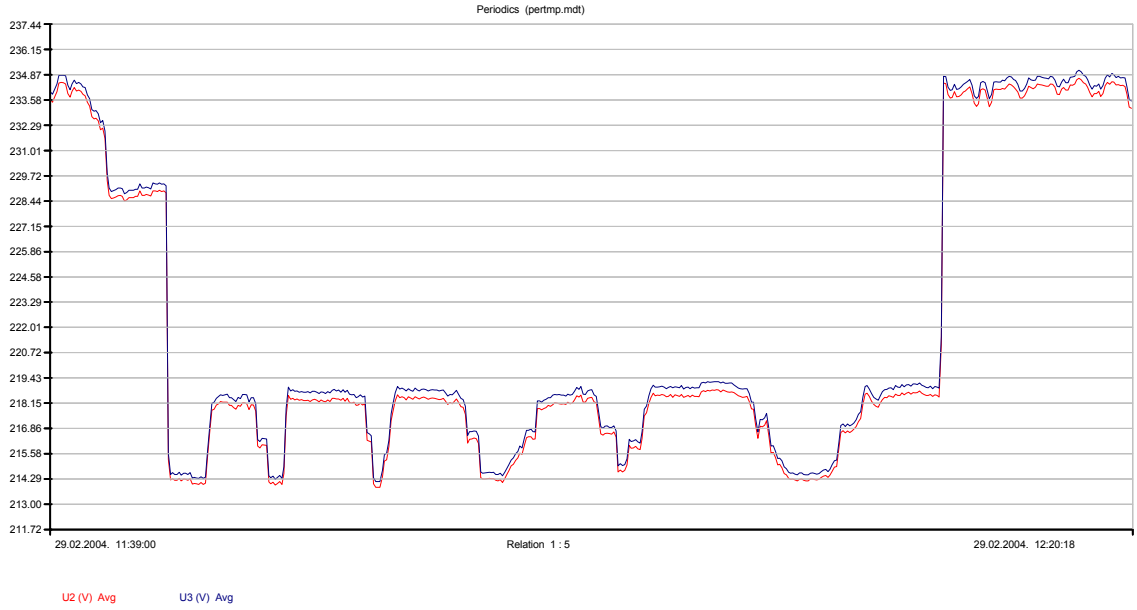


Κλίση στατισμού συχνότητας (πειραματικές μετρήσεις και θεωρητική εξίσωση). Οι αποκλίσεις από τη θεωρητικά υπολογιζόμενη ευθεία, οφείλονται στο μετρητικό σφάλμα του οργάνου καταγραφής.

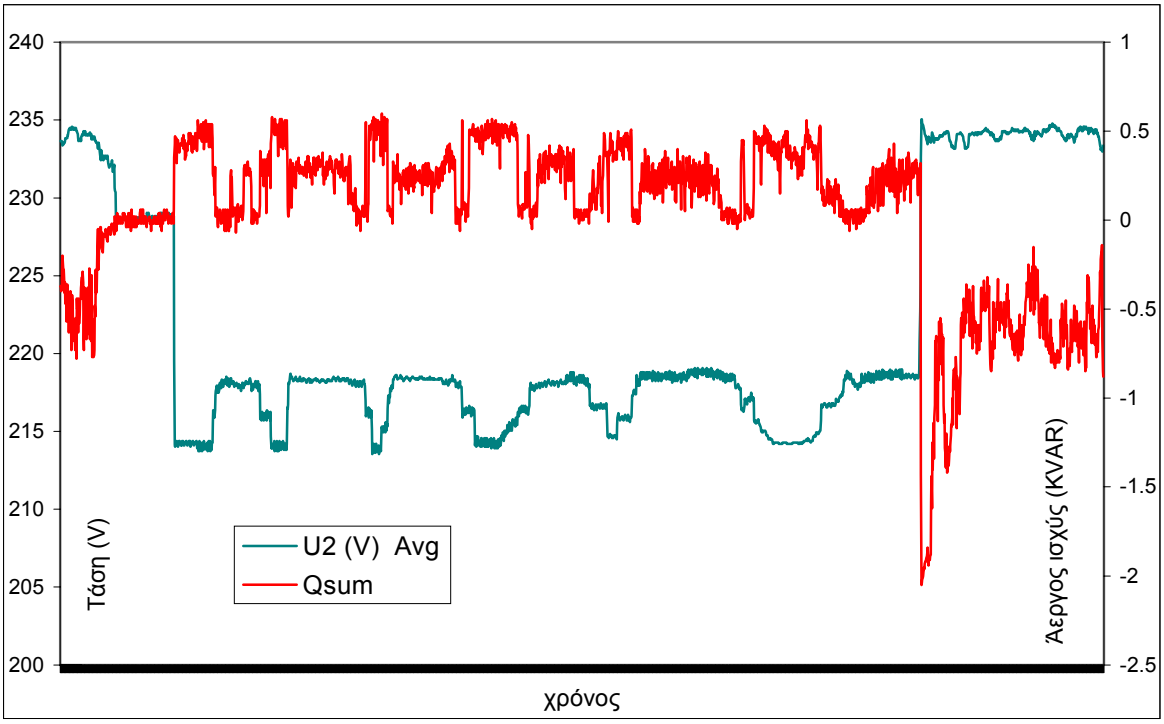




Συντελεστής ισχύος του sunny boy



Τάσεις των αντιστροφέων sunny island και sunny boy, σε μη διασυνδεδεμένη με το δίκτυο λειτουργία

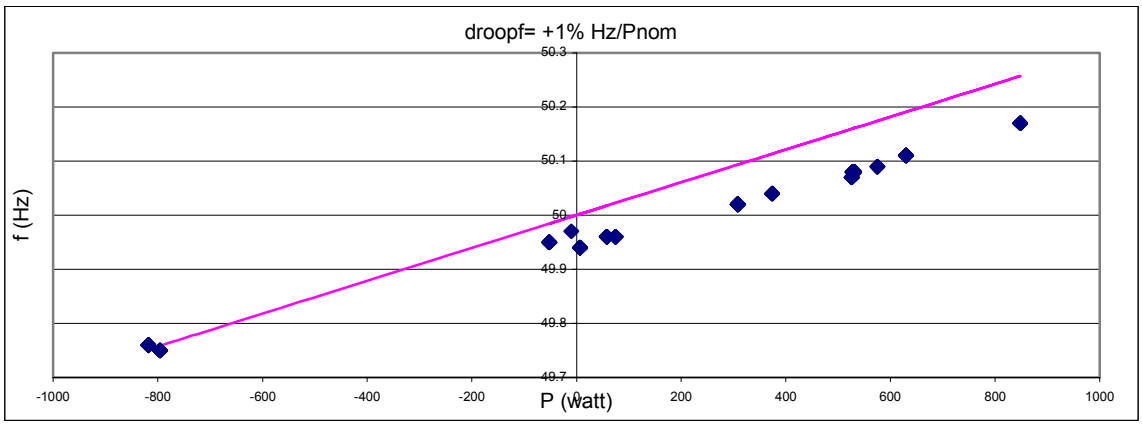


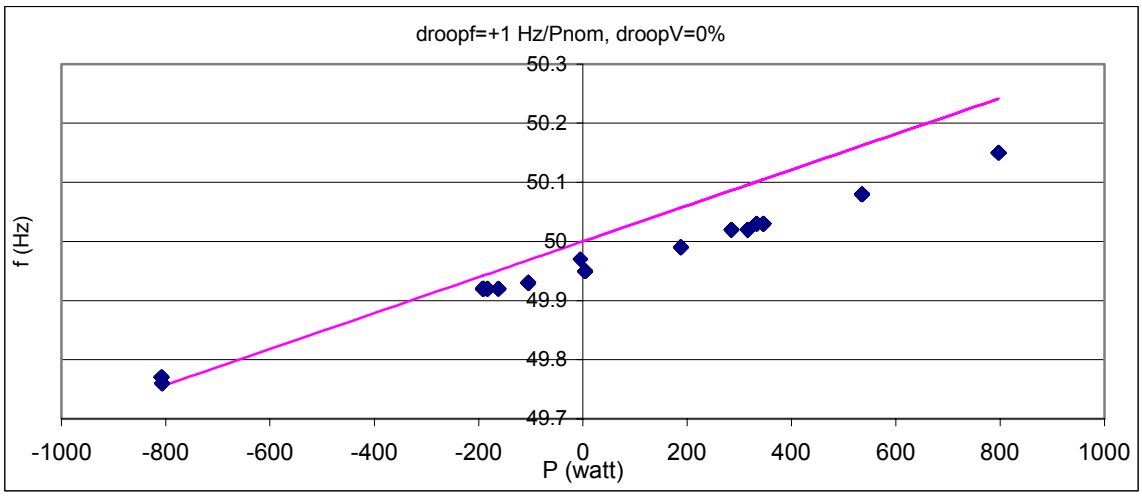
Η κοινή τάση των δύο αντιστροφέων σε κοινό γράφημα με την άεργο ισχύ του φορτίου. Φανερή η επίδραση της τελευταίας στην τάση (αρνητική κλίση στατισμού)

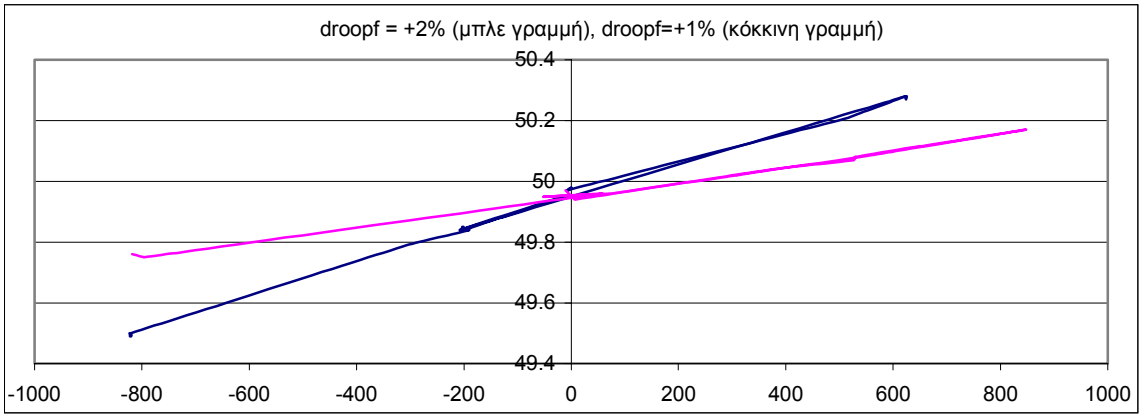
5.5 Μελέτη καμπύλων στατισμού

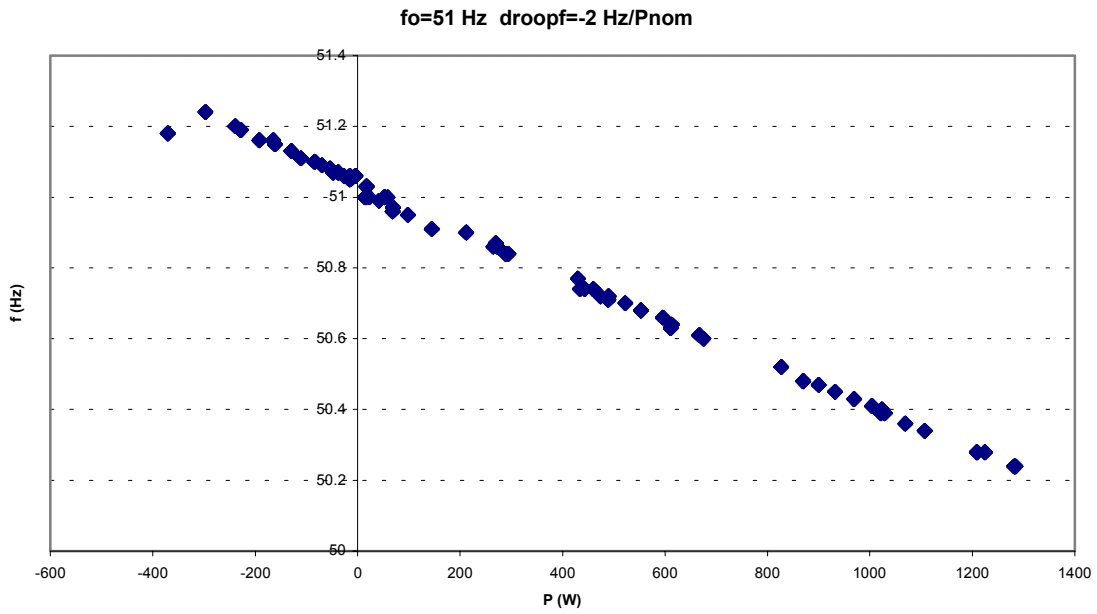
5.5.1 Μετρήσεις χαρακτηριστικών καμπυλών στατισμού σε απομονωμένη λειτουργία, με το πρόγραμμα labview.

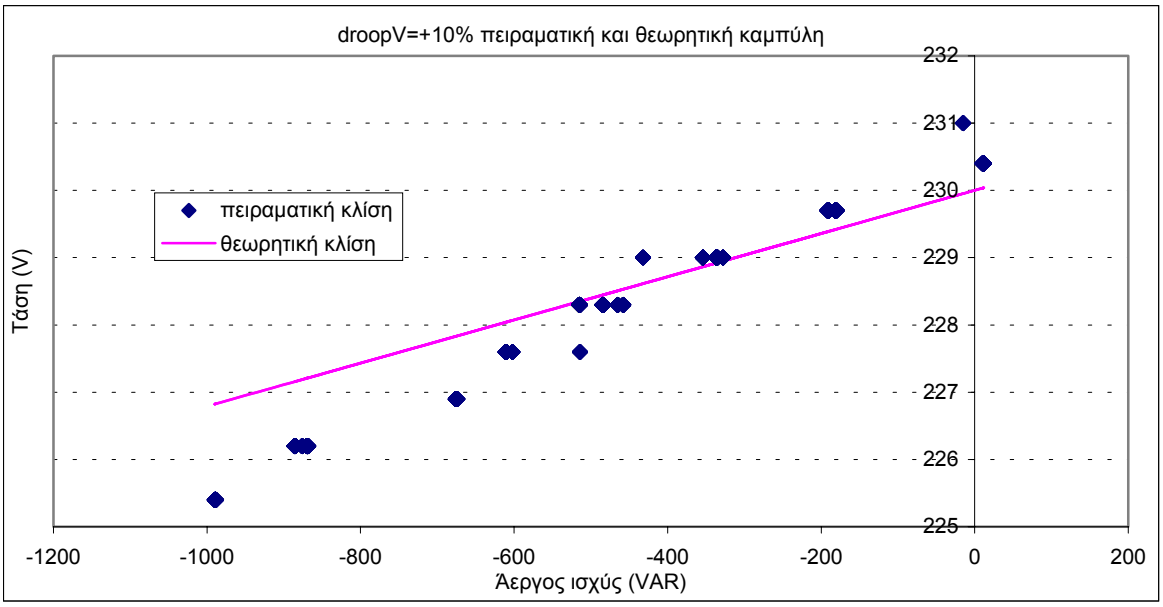
Κατά τις δοκιμές αυτές, μελετάμε τις καμπύλες στατισμού P-f του αντιστροφέα sunny island σε απομονωμένη λειτουργία. Δοκιμάζονται τα φορτία του μικροδικτύου, δηλαδή λαμπτήρες πυρακτώσεως, λαμπτήρες ηλεκτρονικοί CF, και ένας κινητήρας. Οι μετρήσεις παίρνονται από τον αντιστροφέα sunny island, μέσω του προγράμματος επικοινωνίας MATRIKON OPC SERVER, και καταγράφονται με το πρόγραμμα Labview.



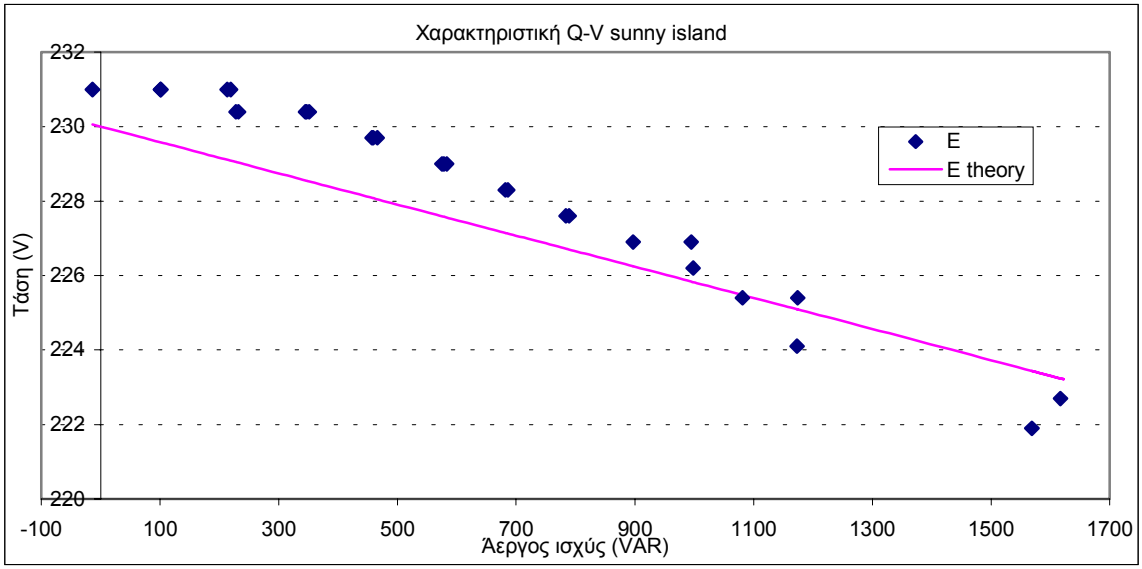








Πείραμα χωρητικών φορτίων με θετική κλίση στατισμού τάσης droopV=10%/Qnom. Η συνεχής γραμμή είναι η θεωρητικά αναμενόμενη σύμφωνα με την εξίσωση στατισμού: $V = V_0 + droopV \cdot Q$**, όπου droopV=10%·Vnom/Qnom=0.1·230 V/3300 VAR=0.006969, δηλαδή:** $V = 230 + 0.006969 \cdot Q$**. Η κλίση δεν ακολουθεί ακριβώς την θεωρητικά αναμενόμενη καθώς μεσολαβεί και η επαγωγική αντίδραση του πηνίου σύνδεσης του αντιστροφέα.**



Χαρακτηριστική κλίση Q-V με τιμή droopV=-10%Von/Qon=-0.1*230/3300=-0.00697, δηλαδή εξίσωση V=230-0.00697*Q. Στο πείραμα έχουμε προσφορά αέργου ισχύος (απομονωμένη λειτουργία). Οι πειραματικές μετρήσεις κινούνται κοντά στην θεωρητική εξίσωση. Δεν έχει ληφθεί υπ' όψιν η άγνωστη επαγωγική αντίδραση σύνδεσης του αντιστροφέα με το απομονωμένο δίκτυο.

5.5.2 Μετρήσεις καμπυλών στατισμού σε διασυνδεδεμένη λειτουργία αλλάζοντας την κανονική συχνότητα και τάση (f_0 και V_0).

Στα πειράματα αυτά, ο αντιστροφέας λειτουργεί παραλληλισμένος στο δίκτυο (RUN_U EXT mode), με έλεγχο της τάσης και της συχνότητας μέσω των droops. Ρυθμίζουμε τις τιμές αυτές, για δε τον στατισμό της συχνότητας
Droopf= -1 Hz/Pnom

ενώ για το στατισμό της τάσης
DroopV= -6%V_0/Qnom

Έτσι ο έλεγχος της ενεργού και της αέργου ισχύος από και προς τον αντιστροφέα γίνεται σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$f = f_0 + droopf \cdot P \Rightarrow P = \frac{(f - f_0)}{droopf}$$

$$V = V_0 + droopV \cdot Q \Rightarrow Q = \frac{(V - V_0)}{droopV}$$

,όπου f η συχνότητα του δικτύου και V η τάση ακροδεκτών του αντιστροφέα ($\vec{V} = \vec{V}grid + j \cdot X \cdot \vec{I}$, με X την επαγωγική αντίδραση μεταξύ αντιστροφέα και δικτύου) (πρακτικά οι τιμές αυτές καθορίζονται από το κεντρικό δίκτυο), ενώ f_0, V_0 οι τιμές της κανονικής συχνότητας και τάσης που καθορίζονται στον αντιστροφέα.

Θεωρητικά, η κλίση των καμπύλων στατισμού πρέπει να έχει συνέχεια την σταθερή τιμή που έχει οριστεί, ενώ η ροή ισχύος προκαλείται κάθε φορά από τη διαφορά f-f_0 (ενεργός ισχύς) και V-V_0 (άεργος ισχύς).

Εάν η τιμή της κλίσης του στατισμού των δύο μεγεθών είναι σταθερή για το κάθε πείραμα, σε κάθε στιγμή, θεωρητικά η διαφορά f-f_0 και V-V_0 είναι αυτή που καθορίζει την ανταλλαγή ενεργού (P-P_0) και άεργου ισχύος (Q-Q_0) μεταξύ αντιστροφέα και δικτύου. Επιλύοντας τις ανωτέρω εξισώσεις ως προς την κλίση της κάθε εξίσωσης (droop) του στατισμού, θα έπρεπε να βρίσκουμε ένα σταθερό λόγο, πολύ κοντά στην τιμή που έχει καθοριστεί στον αντιστροφέα.

$$droopf = \frac{(f - f_0)}{P}$$

$$droopV = \frac{(V - V_0)}{Q}$$

Μετατρέποντας τις κλίσεις των χαρακτηριστικών στις μονάδες του αντιστροφέα θα έχουμε αντίστοιχα:

$$droopf = \frac{\mu}{Pnom}\left(\frac{Hz}{W}\right),$$

όπου μ η τιμή που καθορίζεται ως κλίση συχνότητας (-1)

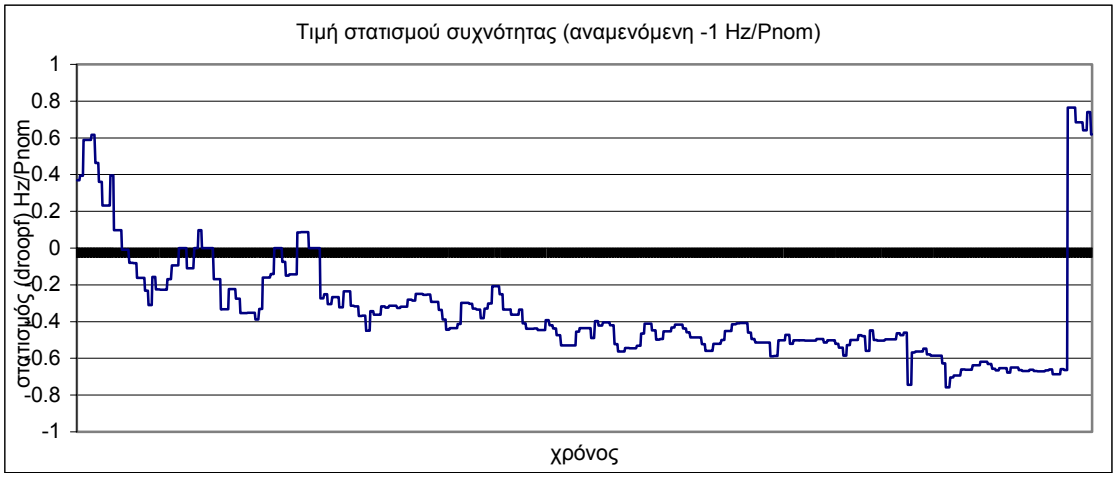
$$droopV = \frac{\kappa\% \cdot Vnom}{Qnom}\left(\frac{V}{VAR}\right),$$

όπου κ η τιμή που καθορίζεται ως κλίση της τάσης (-6)

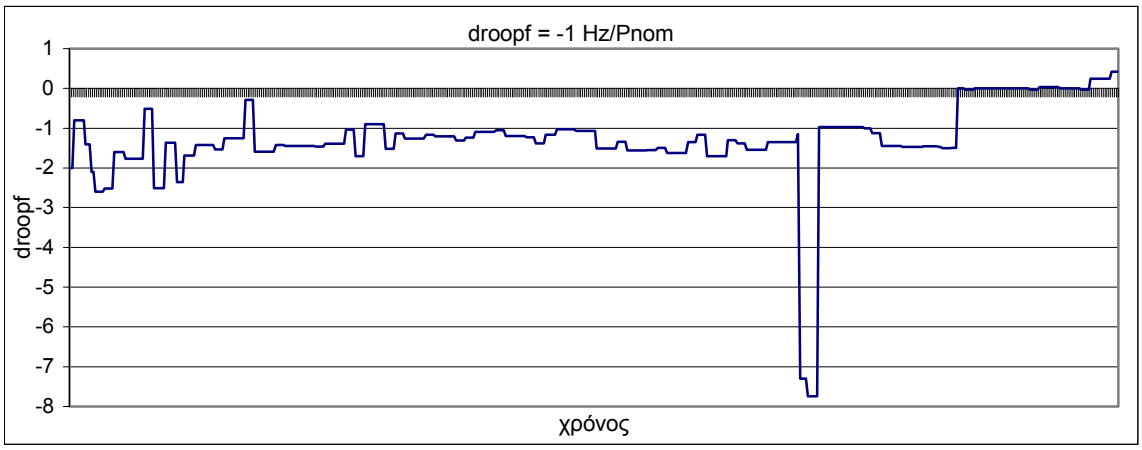
Επιλύοντας λοιπόν ως προς τα μεγέθη κ και μ, τα οποία εισάγουμε στον αντιστροφέα για τις κλίσεις και διατηρούνται σταθερά, θα έχουμε:

$$\mu = Pnom \cdot \frac{(f - f_0)}{P}$$, με μ=-1 Hz

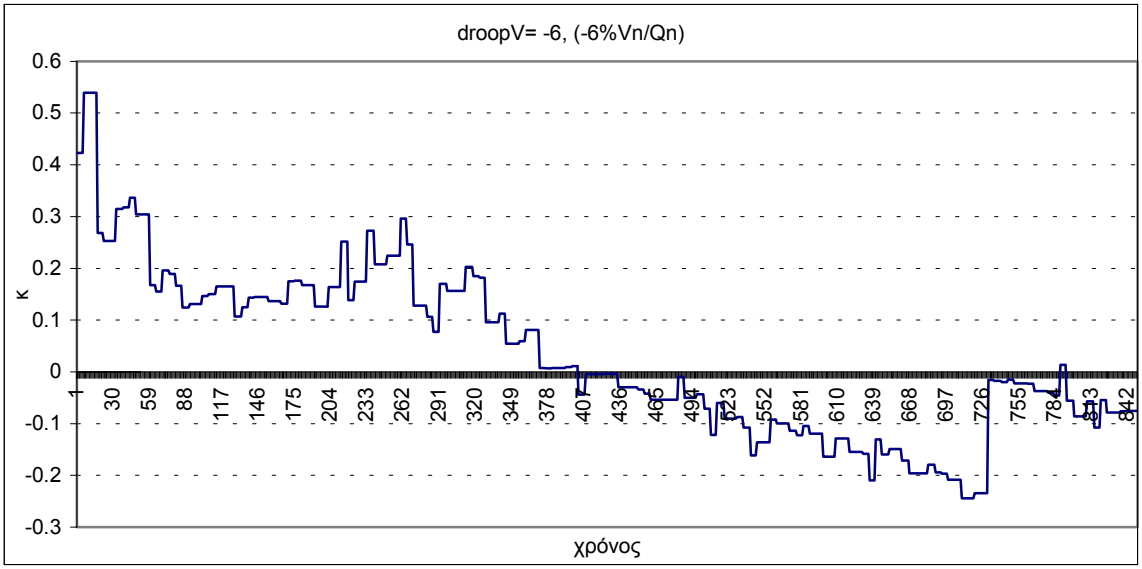
$$\kappa\% = \frac{Qnom}{Vnom} \cdot \left(\frac{V - V_0}{Q} \right)$$, με κ=-6, για το πείραμά μας.



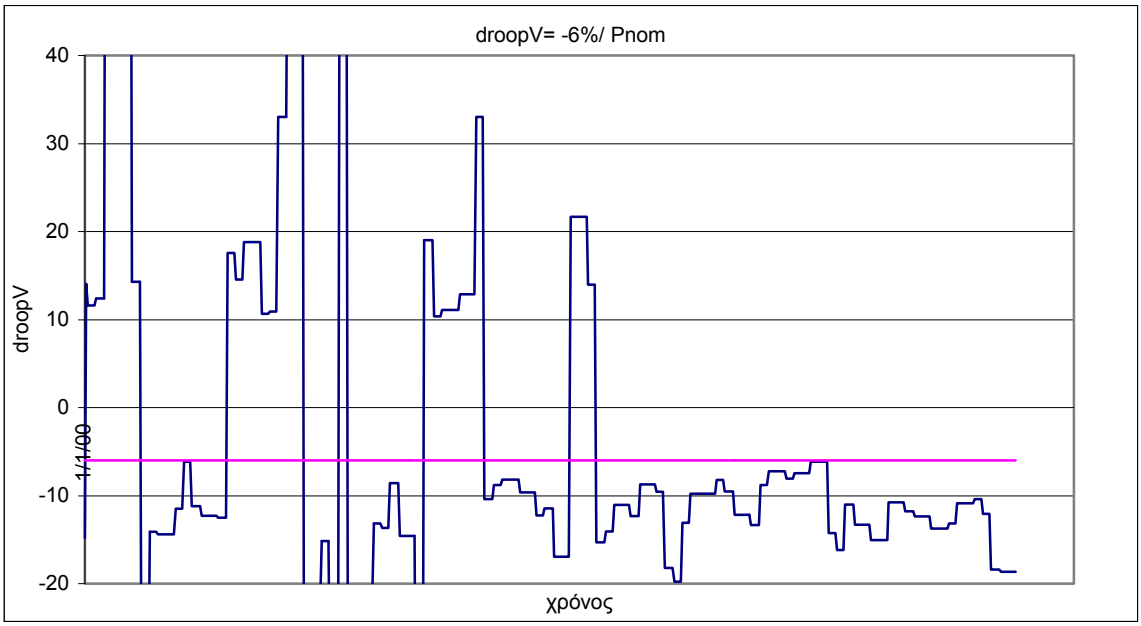
Καμπύλη στατισμού ρυθμισμένη στο –1 Hz/Pnom. Η συχνότητα f_0 του αντιστροφέα ρυθμίζεται αρχικά στα 50 Hz, και μειώνεται με βήμα 0,01 Hz μέχρι τα 49,6 Hz. Η τιμή στον κοινό ζυγό (δίκτυο) ήταν κατά τη διάρκεια του πειράματος περίπου στα 49,98 Hz. Ενώ θα περιμέναμε η τιμή της υπολογιζόμενης τιμής της κλίσης να είναι σταθερή στο –1, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει αλλά αυτή μεταβάλλεται από 0,6 έως και –0,7 Hz/Pnom.



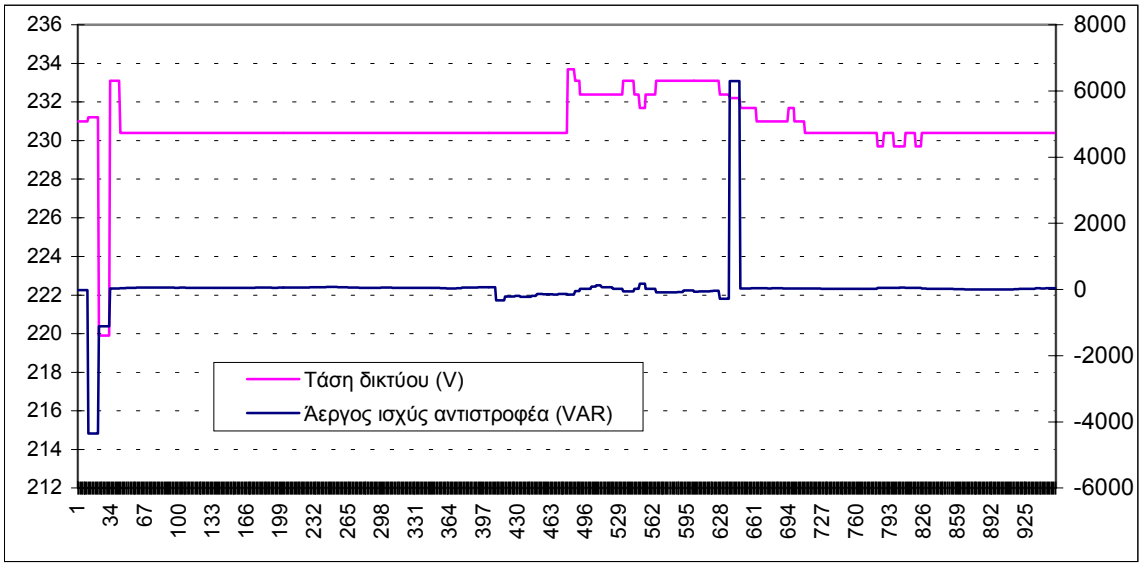
Επαναλαμβάνουμε το ίδιο πείραμα, με διασυνδεδεμένη λειτουργία, αλλά αυτή τη φορά ξεκινάμε με f_0=50 Hz, και ανεβάζουμε σταδιακά την τιμή αυτή μέχρι τα 50,5 Hz, με βήμα 0,01 Hz. Αντίθετα από το προηγούμενο πείραμα, εδώ βλέπουμε ότι η τιμή της καμπύλης droopf, βρίσκεται πάντοτε πολύ κοντά στην αναμενόμενη θεωρητικά τιμή, εκτός από τις περιπτώσεις όπου πραγματοποιείται η αλλαγή της συχνότητας f_0 και έχουμε κάποιες αποκλίσεις.



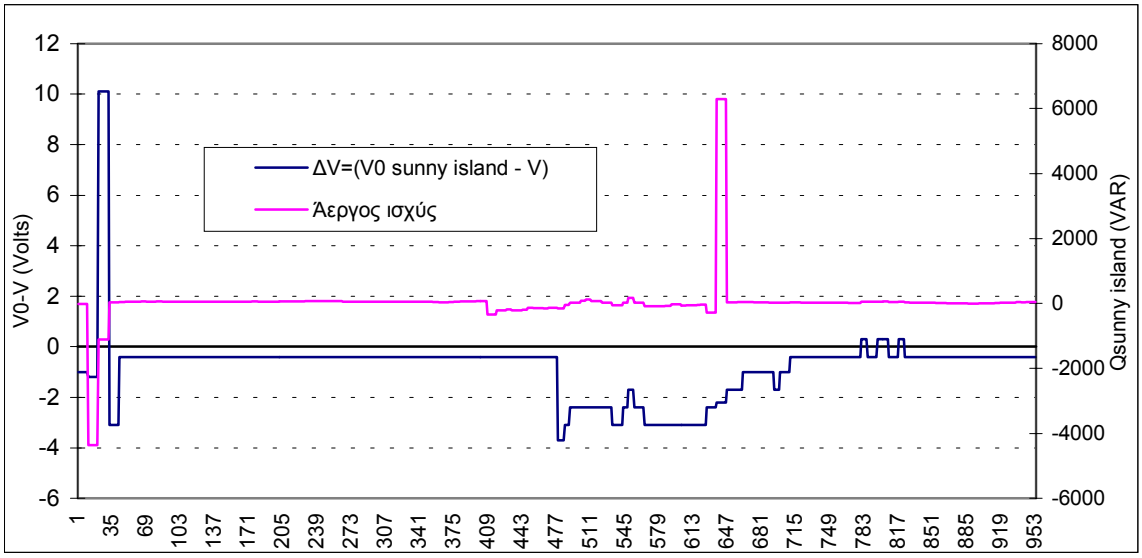
Πείραμα μέτρησης της καμπύλης στατισμού Q-V. Με σταθερή τιμή για την καμπύλη –6%, μεταβάλλουμε την τάση V_0 του αντιστροφέα από τα 230V μέχρι τα 221V, με βήμα 0,5. Η καμπύλη δεν κρατά μια σταθερή τιμή –6% (-0,06), όπως αναμένεται από την θεωρητική εξίσωση.



Επαναλαμβάνουμε το ίδιο πείραμα, με αρχική τάση του αντιστροφέα τα 230V και αύξηση αυτής μέχρι τα 234V, με βήμα 0,1V. Με εμφανείς τις μεγάλες αποκλίσεις που εμφανίζονται τη στιγμή της αλλαγής της κανονικής τάσης, εδώ φαίνεται πιο καθαρά ότι η τιμή της κλίσης στατισμού της τάσης προσπαθεί να μείνει κοντά στην τιμή –6% /Qnom, που έχει καθοριστεί και είναι και θεωρητικά αναμενόμενη (ροζ γραμμή).



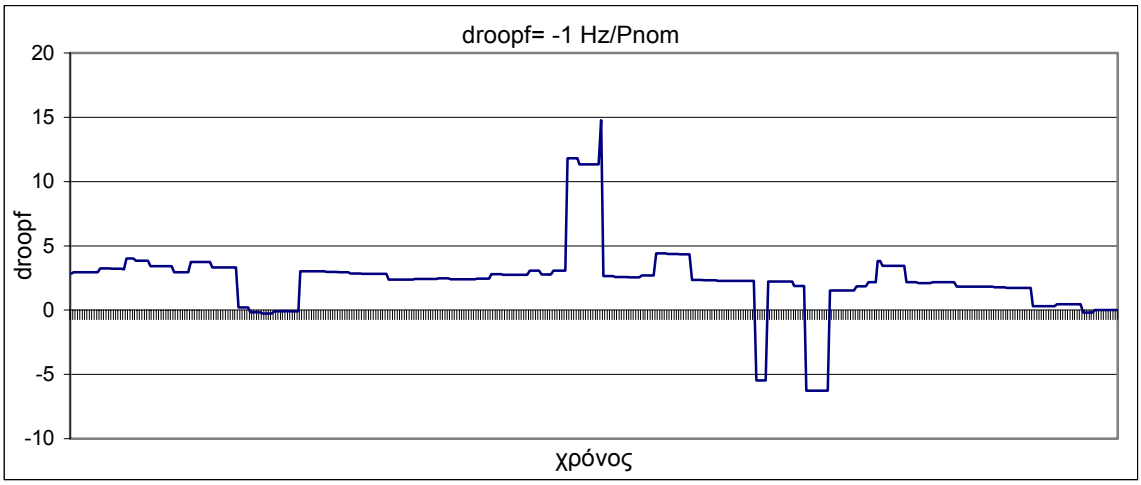
Παραδείγματα ασταθούς λειτουργίας του αντιστροφέα με θετική κλίση droopV=+6% κατά τη διάρκεια διασυνδεδεμένης λειτουργίας. Ονομαστική τάση V_0=230V.



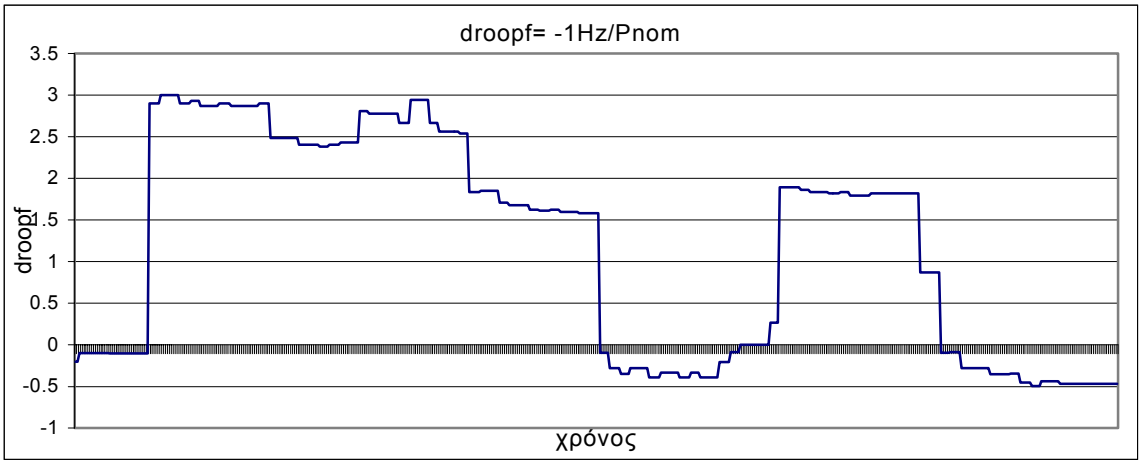
Διαφορά τάσης αντιστροφέα και δικτύου στο ίδιο γράφημα με την άεργο ισχύ. Εικονίζονται τα δύο χρονικά διαστήματα (αρχή και 647sec), στα οποία επιχειρείται διασυνδεδεμένη λειτουργία του αντιστροφέα με το δίκτυο, με θετική κλίση στατισμού τάσης. Η άεργος ισχύς που απορροφά ή προσφέρει αντίστοιχα τις δύο αυτές στιγμές δεν αντιστοιχεί σ' αυτήν που προκύπτει από την θεωρητική εξίσωση της κλίσης στατισμού $Q = \frac{(V - V_0)}{droopV}$

5.5.3 Μετρήσεις καμπυλών στατισμού σε απομονωμένη λειτουργία (RUN_U) αλλάζοντας την κανονική συχνότητα και τάση (f_0 και V_0).

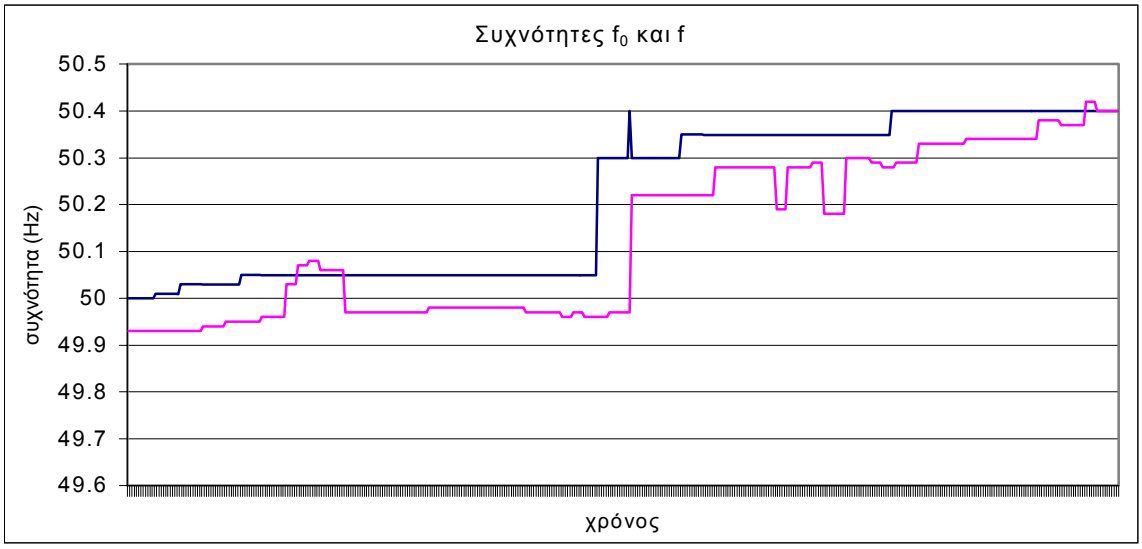
Κατά το πείραμα αυτό, το μικροδίκτυο λειτουργεί σε απομονωμένη λειτουργία από το κεντρικό δίκτυο, δηλαδή ο αντιστροφέας βρίσκεται σε κατάσταση RUN_U με έλεγχο droops, οπότε και ρυθμίζει αυτός την τάση και την συχνότητα του δικτύου. Δοκιμάζουμε διάφορα φορτία, συνολικής ισχύος μέχρι 1000 Watt, για να διαπιστώσουμε αν λειτουργεί σύμφωνα με τις καμπύλες στατισμού. Οι τιμές έχουν οριστεί πάλι στα –1 Hz/Pnom για τον στατισμό συχνότητας, και –6%/Qnom για τον στατισμό της τάσης.



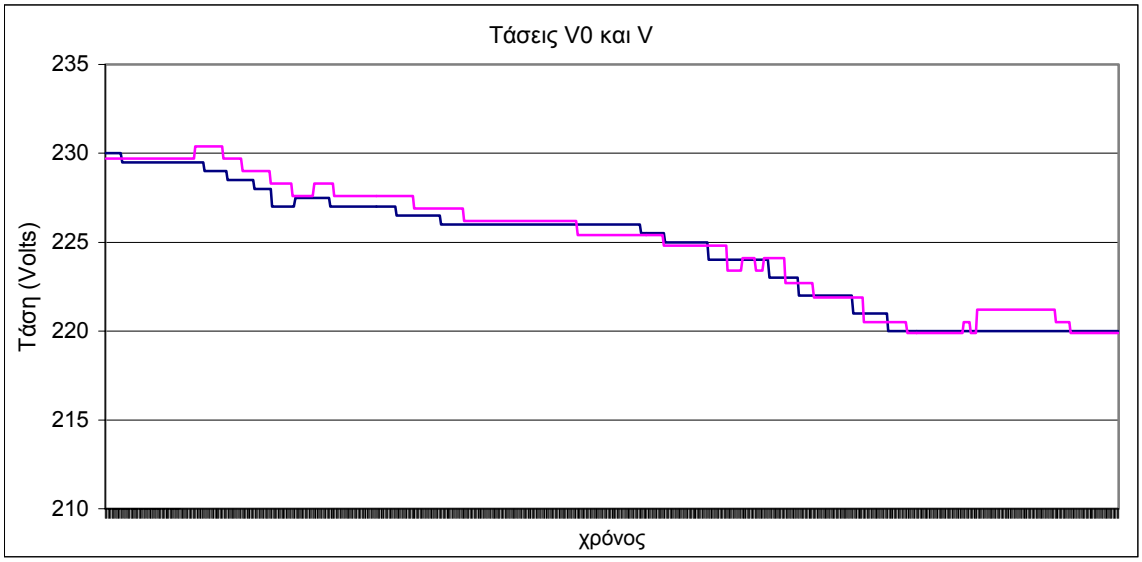
Τιμή της καμπύλης στατισμού droopf για διάφορα φορτία και για τιμές κανονικής συχνότητας από 50 Hz έως και 50,4 Hz. Η καμπύλη δεν ανταποκρίνεται στην θεωρητικά αναμενόμενη.



Το ίδιο πείραμα με την συχνότητα να μεταβάλλεται από 50 Hz σε 49,6Hz.



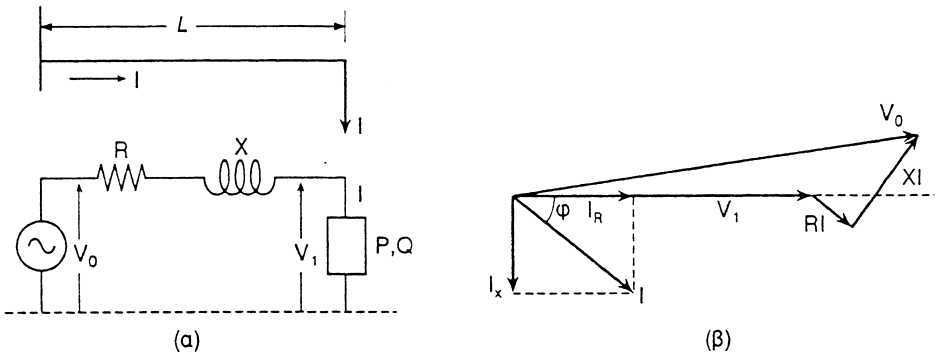
Μπλε γραμμή: f_0 (ονομαστική συχνότητα), κόκκινη γραμμή f (πραγματική συχνότητα). Ο αντιστροφέας προσπαθεί να επιβάλλει συνεχώς την συχνότητα που ορίζεται ως ονομαστική.



Μεταβολή της κανονικής τάσης V_0 από 230 στα 220V. Ο αντιστροφέας ακολουθεί την τάση που ορίζεται ως ονομαστική.

5.6 Πτώση τάσης σε γραμμή διανομής χαμηλής τάσης με διαφορετικές κλίσεις καμπύλων στατισμού.

Όπως παρουσιάστηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, τα μικροδίκτυα λειτουργούν κατά βάση στην χαμηλή τάση, όταν έχουμε να κάνουμε με μεγέθη της τάξεως των δεκάδων KW. Ένα στάδιο μεταφοράς μέσης τάσης μπορεί να κριθεί απαραίτητο όταν έχουμε ένα απομονωμένο μικροδίκτυο της τάξεως των λίγων MW, ή αν οι φυσικές αποστάσεις των σταθμών παραγωγής και των καταναλώσεων είναι μεγάλες. Λόγω της χαμηλής τάσης 220/380V, στα δίκτυα κυκλοφορεί συνήθως ισχύς μεγάλης εντάσεως πράγμα που συμβάλει στην δημιουργία μεγάλης πτώσης τάσης στις αφίξεις των γραμμών διανομής της ισχύος. Η τάση αυτή είναι επιθυμητό να κρατείται στα ανεκτά όρια που ορίζει η κάθε ηλεκτρική εταιρία και ισχύουν για το κεντρικό δίκτυο χαμηλής τάσης, προκειμένου να μην δημιουργούνται προβλήματα στις ηλεκτρικές συσκευές.



Εικόνα 5.1 – Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας, γραμμής διανομής και φορτίου και ανυσματικό διάγραμμα των τάσεων και εντάσεων

Για την μελέτη των δικτύων χαμηλής τάσης, μπορεί να παραληφθεί η επίδραση της χωρητικότητας των γραμμών, καθώς αυτή είναι πολύ μικρή. Αντίθετα σημαντικό ρόλο παίζουν τόσο η αντίσταση των γραμμών όσο και η επαγωγή. Για μια γραμμή χαμηλής τάσης με ωμική αντίσταση R και επαγωγική αντίδραση X, η οποία τροφοδοτεί φορτίο που απορροφά ισχύ P και Q, θα έχουμε για τις τάσεις αναχωρήσεως και αφίξεως, V_0 και V_1 αντίστοιχα:

$$V_0 = V_1 + (I_R - j \cdot I_X) \cdot (R + j \cdot X) = V_1 + (I_R \cdot R + I_X \cdot X) + j \cdot (I_R \cdot X - I_X \cdot R)$$

με

$$I_R = I \cdot \cos\phi$$

και

$$I_X = I \cdot \sin\phi$$

έχουμε

$$V_0 = V_1 + I \cdot (R \cdot \cos\phi + X \cdot \sin\phi) - j \cdot (R \cdot \sin\phi - X \cdot \cos\phi)$$

Η τάση αναχωρήσεως τότε γράφεται:

$$V_0^2 = [V_1 + I_R \cdot R + I_X \cdot X]^2 + [I_X \cdot R - I_R \cdot X]^2$$

Παραλείποντας τον δεύτερο όρο, ο οποίος για τα δεδομένα των δικτύων διανομής είναι πολύ μικρότερος από τον πρώτο, έχουμε τελικά:

$$V_0 = V_1 + I \cdot (R \cdot \cos\phi + X \cdot \sin\phi) = V_1 + R \cdot I_R + X \cdot I_X$$

Για την έκφραση του μεγέθους της πτώσεως τάσεως μεταξύ των δύο άκρων της γραμμής χρησιμοποιείται το μέγεθος:

$$\boxed{\varepsilon\% = \frac{V_0 - V_1}{V_1} \cdot 100 = \frac{\Delta V}{V_1} \cdot 100} \quad \textbf{(1)}$$

όπου $\Delta V = V_0 - V_1 = I \cdot (R \cdot \cos\phi + \mathrm{X} \cdot \sin\phi)$

Εκφράζοντας το φορτίο I με την φαινόμενη ισχύ έχουμε:

$$S = V_1 \cdot I^* = P + j \cdot Q = V_1 \cdot I \cdot \cos\phi + V_1 \cdot I \cdot \sin\phi$$

δηλαδή $I_R = \dfrac{P}{V_1}$ και $I_X = \dfrac{Q}{V_1}$

Έτσι η εξίσωση για την πτώση τάσεως γράφεται:

$$\boxed{\varepsilon\% = \frac{100}{V_1^2} \cdot \left(R \cdot P + X \cdot Q\right)} \quad \textbf{(2)}$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (1) και (2) μπορούμε να μετρήσουμε την πτώση τάσης στην άφιξη μιας γραμμής μεταφοράς, έχοντας γνωστά είτε τα μεγέθη των δύο τάσεων, είτε την σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς και τα φορτία που τροφοδοτούνται από αυτήν.

Οι τιμές της ωμικής αντίστασης και επαγωγικής αντίδρασης που συναντώνται στην πράξη, διαφέρουν ανάλογα με το υλικό του καλωδίου που χρησιμοποιείται, (χαλκός, αλουμίνιο) καθώς και το είδος του (εναέριο, συνεστραμένο, σύνδεσης, υπόγειο). Ο παρακάτω πίνακας δείχνει ενδεικτικά τις τιμές των R,X για τους συνήθεις τύπους καλωδίων χαμηλής τάσης.

	Είδος αγωγού	**R (Ω/km)**	**X (Ω/km)**	**R_n (Ω/km)**	**R/X**
1	Εναέριο – συνεστραμένο 4x120 mm^2 Al	0.284	0.083	0.284	3.42
2	Εναέριο – συνεστραμένο 3x70 mm^2 Al + 54.6 mm^2 AAAC	0.497	0.100	0.630	4.97
3	Εναέριο – Αγωγός 4x50 mm^2 Al	0.397	0.279		1.42
4	Εναέριο – Αγωγός 4x35 mm^2 Al	0.574	0.294		1.95
5	Εναέριο – Αγωγός 4x16 mm^2 Al	1.218	0.318		3.83
6	Υπόγειο – XLPE καλώδιο 3x150 mm^2 Al + 50 mm^2 Cu	0.264	0.071	0.387	3.72
7	Αγωγός σύνδεσης - καλώδιο 4x6 mm^2 Cu	3.690	0.094		39.2
8	Αγωγός σύνδεσης - καλώδιο 4x16 mm^2 Cu	1.380	0.082		16.8
9	Αγωγός σύνδεσης - καλώδιο 4x25 mm^2 Cu	0.871	0.081		10.7
10	Αγωγός σύνδεσης - καλώδιο 3x50 mm^2 Al + 35 mm^2 Cu (XLPE)	0.822	0.077	0.524	10.7
11	Αγωγός σύνδεσης - καλώδιο 3x95 mm^2 Al + 35 mm^2 Cu (XLPE)	0.410	0.071	0.524	5.8

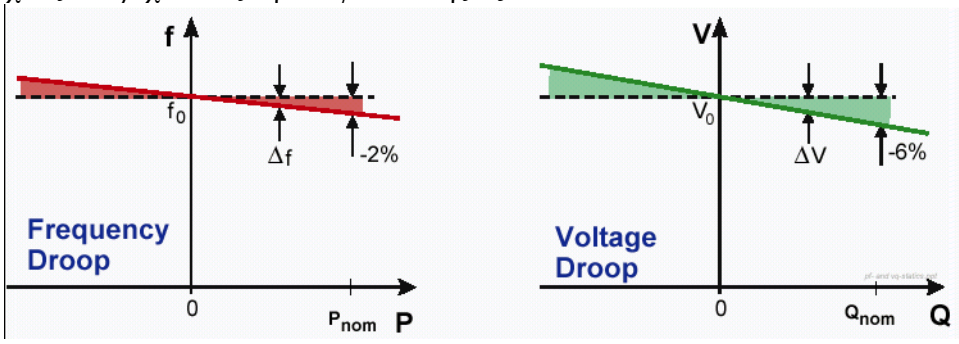
Πίνακας 5.1 – Χαρακτηριστικές αντιστάσεις καλωδίων χαμηλής τάσης

Το εργαστηριακό μικροδίκτυο

Όπως τονίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το εργαστηριακό μικροδίκτυο που εξετάζουμε έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί είτε απομονωμένα από το κεντρικό δίκτυο είτε σε σύνδεση με αυτό. Ο έλεγχος της ισχύος του ρυθμιστικού αντιστροφέα sunny island γίνεται σε αμφότερες τις περιπτώσεις από τον αλγόριθμο των κλίσεων στατισμού P-f και Q-V.

Οι προεγκατεστημένες τιμές (default) και για τις δύο εξισώσεις έχουν καθοριστεί αρνητικές (οι κλίσεις δηλαδή των εξισώσεων τάσης – αέργου ισχύος [droopV=-6%] και συχνότητας - ενεργού ισχύος [droopf=-1]). Συνέπεια αυτού, σε απομονωμένη λειτουργία του μικροδικτύου, είναι ο αντιστροφέας να ρίχνει την συχνότητα όσο αυξάνει η ενεργός ισχύς εξόδου του καθώς και την τάση όσο αυξάνει η άεργος ισχύς εξόδου του (όταν προσφέρει δηλαδή θετική άεργο ισχύ, επαγωγικά φορτία).

Σε διασυνδεδεμένη με το δίκτυο λειτουργία, ο αντιστροφέας προσφέρει ή απορροφά ενεργό και άεργο ισχύ ανάλογα με τις τιμές της συχνότητας και της τάσης του δικτύου, αντίστοιχα. *Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώνεται ότι με κανονική τάση V_0=230V και αρνητική κλίση του στατισμού της τάσης droopV=-6%, ο αντιστροφέας συνεργάζεται ομαλά με το κεντρικό δίκτυο, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα από τις διακυμάνσεις στην τάση του. Αντίθετα, διαπιστώνεται ότι με ονομαστική τάση V_0=230V και θετική κλίση droopV, ο αντιστροφέας δεν συνεργάζεται ομαλά, δίνοντας για παράδειγμα μεγάλα ρεύματα αέργου ισχύος και ρίχνοντας την ασφάλεια της εξόδου του.*



Εικόνα 5.2 - Χαρακτηριστικές καμπύλες στατισμού συχνότητας και τάσης του αντιστροφέα sunny island

Ενώ λοιπόν η ενεργός ισχύς επιδρά στην συχνότητα του δικτύου, η άεργος ισχύς επιδρά στην τάση, που για το πείραμα που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε είναι η τάση αναχωρήσεως του δικτύου διανομής. Η κλίση αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της πτώσεως τάσης στο άκρο των γραμμών διανομής. Ενώ δηλαδή η αρνητική κλίση θα ρίχνει την τάση του μικροδικτύου με προσφορά θετικής αέργου ισχύος (επαγωγική φόρτιση), με συνέπεια να πέφτει ομοίως και η τάση αφίξεως, η θετική κλίση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ώστε η τάση λειτουργίας να ανυψώνεται όταν υπάρχει μεγάλη ζήτηση άεργων φορτίων (επαγωγικών), οπότε και η τάση αφίξεως να κρατείται στα επιτρεπτά όρια. Έτσι, ανάλογα με τις συνηθέστερες φορτίσεις του μικροδικτύου μπορεί να επιλεχθεί αρνητική ή θετική κλίση.

Το σκεπτικό λοιπόν συνοψίζεται ως εξής:
Με αρνητική κλίση έχουμε ανύψωση τάσης σε χωρητικά φορτία
Με θετική κλίση έχουμε ανύψωση τάσης σε επαγωγικά φορτία

Για την μελέτη των ανωτέρω χρησιμοποιήσαμε ως προσομοίωση μιας γραμμής διανομής ένα καλώδιο NYA 5*1,5mm^2, 100 μέτρων, τυλιγμένο κουλούρα ώστε να υπάρχει και μεγάλη επαγωγική αντίδραση. Οι μετρούμενες τιμές είναι για τον ένα αγωγό:

R=1,2 Ohm

L=2 mH=0,002H

Η μέτρηση της επαγωγικής αντίδρασης έγινε με ιδιοκατασκευή που δεν παρέχει μεγάλη ακρίβεια. Πρόκειται για έναν αντάπτορα πολυμέτρου, ο οποίος και χρησιμοποιεί ένα ταλαντωτή υψηλής συχνότητας και έχει ως έξοδο τάση (ARRL Handbook 1994). Συνεπώς για τη μονοφασική γραμμή δύο αγωγών (φάσης – ουδετέρου) θα έχουμε:

R=2,4 Ω και L=0,004H.

Μετατρέποντας την αυτεπαγωγή σε επαγωγική αντίδραση θα πάρουμε:

$X = \omega \cdot L = 2\pi\nu \cdot L = (2\pi \cdot 50) \cdot L = 100\pi \cdot 0{,}004 = 1{,}25\Omega$

Οι τιμές είναι πολύ μεγάλες, αντιστοιχούν δηλαδή σε εναέριο καλώδιο Al 4*35mm^2, τεσσάρων περίπου χιλιομέτρων.

Η αναχώρηση της γραμμής γίνεται από την πρίζα του πίνακα του μικροδικτύου, πολύ κοντά στον αντιστροφέα sunny island ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν αξιόπιστες μετρήσεις. Έτσι θεωρούμε ότι η τάση αναχωρήσεως συμπίπτει με την τάση εξόδου του sunny island, η οποία και μετριέται με το πρόγραμμα labview μέσω της θύρας RS-232 και του προγράμματος Matrikon OPC explorer.

Να σημειωθεί ότι η μέτρηση που καταγράφεται από τον αντιστροφέα είναι διαφορετική από αυτή που μετράται από τα όργανα του πίνακα ελέγχου ή ένα πολύμετρο στις πρίζες του πίνακα του μικροδικτύου. Ενώ δηλαδή σε κενό φορτίο, απομονωμένη λειτουργία και ενεργό μόνο τον αντιστροφέα (V_0=230V), διαβάζουμε στα όργανα 229,7V rms, ο αντιστροφέας καταγράφει μια τάση 231V (η οποία και λαμβάνεται από υπολογιστή). Μια πιθανή εξήγηση για αυτή τη διαφωνία, είναι ότι τα όργανα μέτρησης της τάσης μετράνε RMS τιμές στην βασική συχνότητα 50Hz, χωρίς να λαμβάνουν υπ' όψιν την αρμονική παραμόρφωση της τάσης.

Ομοίως πρέπει να ξεκαθαριστεί ότι η τάση εξόδου του αντιστροφέα είναι διαφορετική από την εσωτερική του ΗΕΔ. Μεταξύ των δύο τάσεων μεσολαβεί ένα πηνίο σύνδεσης (coupling inductor), του οποίου την τιμή παίρνουμε από αναφορές L=0.8mH, συνεπώς για τη συχνότητα των 50Hz, η αντίδραση αυτού θα είναι X=ωL=2πνL=100πL. Αντικαθιστώντας βρίσκουμε X=0.2513Ω. Η εσωτερική ΗΕΔ Ε προκύπτει τότε: $\vec{E} = \vec{V} + j \cdot X \cdot \vec{I}$, όπου I το ρεύμα που ρέει από ή προς τον αντιστροφέα.

Στις μετρήσεις δεν χρησιμοποιούμε την εσωτερική ΗΕΔ, αλλά κάνουμε μια αντιστάθμιση κατά 1,5V, διαφορά που μετράται στα δύο καταγραφικά όργανα χωρίς φορτίο στην γραμμή.

Η άφιξη της γραμμής μεταφοράς γίνεται στον πίνακα των φορτίων του μικροδικτύου, και η τάση μετριέται με πολύμετρο PROTEK 506, το οποίο διασυνδέεται με υπολογιστή μέσω θύρας RS-232, ώστε να καταγράφονται οι τιμές. Και τα δύο συστήματα παίρνουνε τιμές περίπου κάθε 1 δευτερόλεπτο. Το πείραμα περιλαμβάνει την δοκιμή φορτίων τριών τύπων ώστε να μελετηθεί η απόκριση της πτώσης τάσης στο άκρο της γραμμής, σε σχέση τόσο με τον τύπο του φορτίου, όσο και με την κλίση της χαρακτηριστικής Q-V. Σε κάθε δοκιμή δοκιμάζουμε διαδοχικά:

- λάμπες πυρακτώσεως συνολικά 500W (ωμικού καθαρά χαρακτήρα)
- λάμπες ηλεκτρονικές συνολικού φορτίου 75W (απορροφώντας ενεργό αλλά και αρνητική άεργο ισχύ, χωρητικού Σ.Ι.)

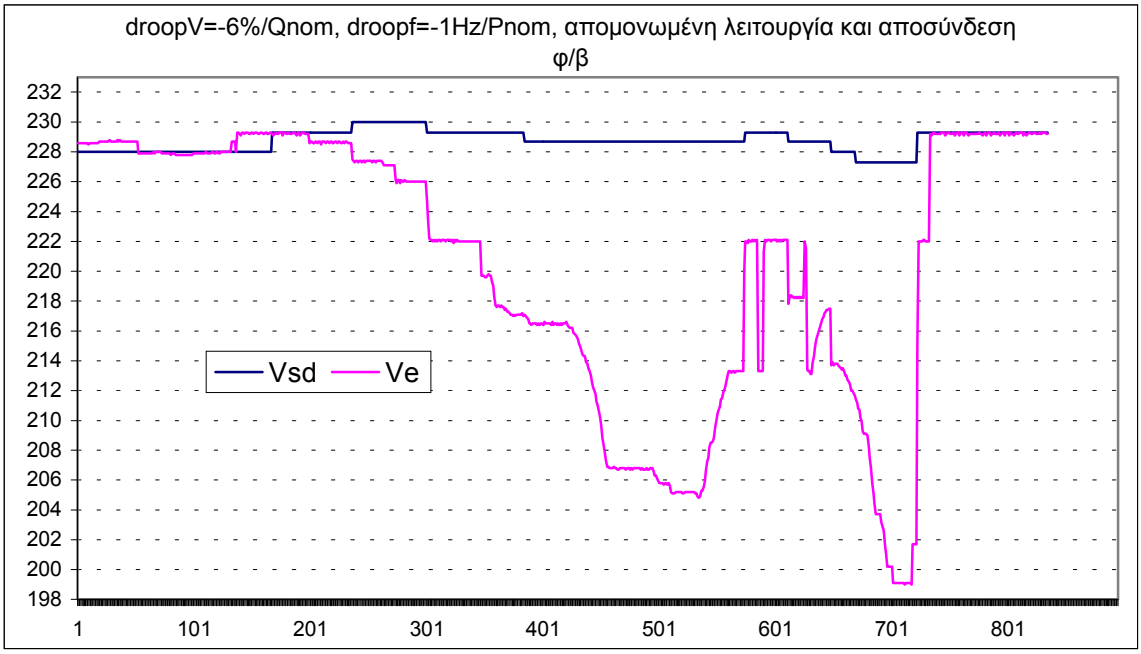
- κινητήρας 350W (απορροφώντας ενεργό και επαγωγική άεργο ισχύ)
- αντιστάσεις
- πηνία
- πυκνωτές

5.6.1 Κλίσεις DroopV=-6%/Qnom, Droopf=-1%Hz/Pnom

(Απομονωμένη λειτουργία μικροδικτύου, **αποσύνδεση** sunny boy)

Πορεία πειράματος:

- Αρχικά χωρίς φορτία, εισροή στον αντιστροφέα sunny island της ισχύος των φωτοβολταϊκών. (περίπου 0,83KW)
- 60δευτ: διασύνδεση όλων των λαμπτήρων
- 120δευτ: αποσύνδεση όλων των λαμπτήρων
- 160δευτ: αποσύνδεση αντιστροφέα sunny boy. (μηδενική ισχύς από ή προς τον sunny island)
- 200δευτ: σύνδεση ηλεκτρονικών λαμπτήρων
- 240δευτ: σύνδεση και λαμπτήρων πυράκτωσης
- 300δευτ: σταδιακή σύνδεση αντιστάσεων (συνολικό ρεύμα 8A)



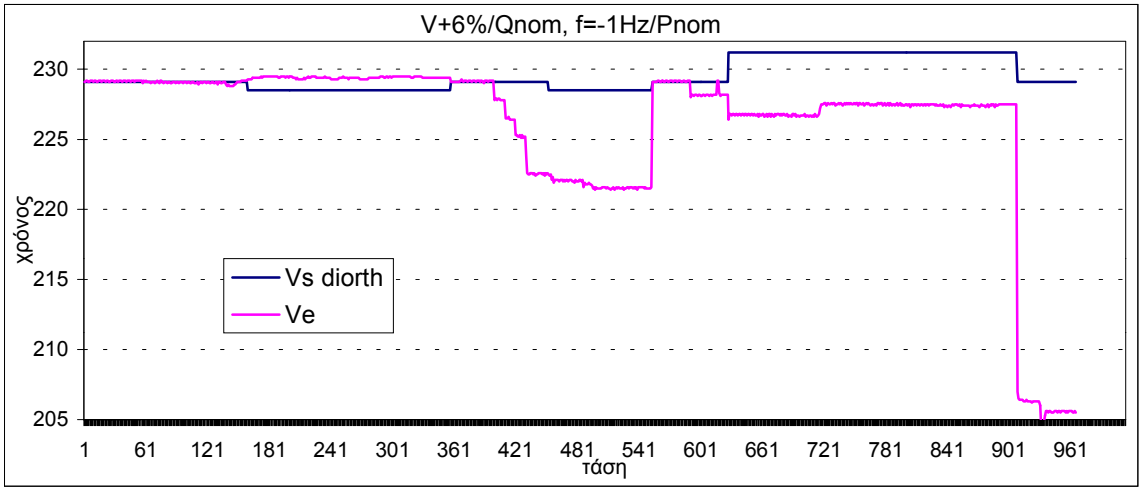
Με το πείραμα αυτό βλέπουμε τα εξής: Η σύνδεση φορτίων ενώ είναι συνδεδεμένος ο αντιστροφέας των φ/β δεν επηρεάζει την τάση καθώς η ισχύς του είναι μεγαλύτερη από αυτήν που απορροφάται. Με την αποσύνδεση του sunny boy, ο αντιστροφέας sunny island μένει μοναδική πηγή ισχύος προς τα φορτία, και η σταδιακή σύνδεση ωμικών και επαγωγικών φορτίων ρίχνει την τάση στην άφιξη της γραμμής προς τα φορτία. Η τάση δε αναχωρήσεως (τάση sunny island) δεν μειώνεται αισθητά γιατί χρησιμοποιήσαμε κυρίως ωμικά φορτία. Με ένα συνολικό φορτίο εξόδου 2283W, 200VAR έχουμε φτάσει σε μία τάση στο άκρο της γραμμής 199,1V.

5.6.2 Κλίσεις DroopV=+6%/Qnom, Droopf=-1Hz/Pnom

Απομονωμένη λειτουργία του μικροδικτύου, σύνδεση και αποσύνδεση φ/β

Πορεία πειράματος:

- Αρχικά, χωρίς φορτία και φωτοβολταϊκά
- 100δευτ: σύνδεση φωτοβολταϊκών (εισερχόμενη ισχύς μέχρι 850W)
- 300δευτ: αποσύνδεση φωτοβολταϊκών
- 400δευτ: σύνδεση λαμπτήρων πυρακτώσεως (500W)
- 480δευτ: σύνδεση ηλεκτρονικών λαμπτήρων (75W)
- 600δευτ: αποσύνδεση λαμπτήρων πυρακτώσεως (μόνο ηλεκτρονικοί)
- 636δευτ: σύνδεση κινητήρα
- 723δευτ: αποσύνδεση λαμπτήρων (μόνο κινητήρας)
- 871δευτ: σύνδεση και αντιστάσεων (ρεύμα συνολικά 8A)
- 983δευτ: αποσύνδεση όλων των φορτίων



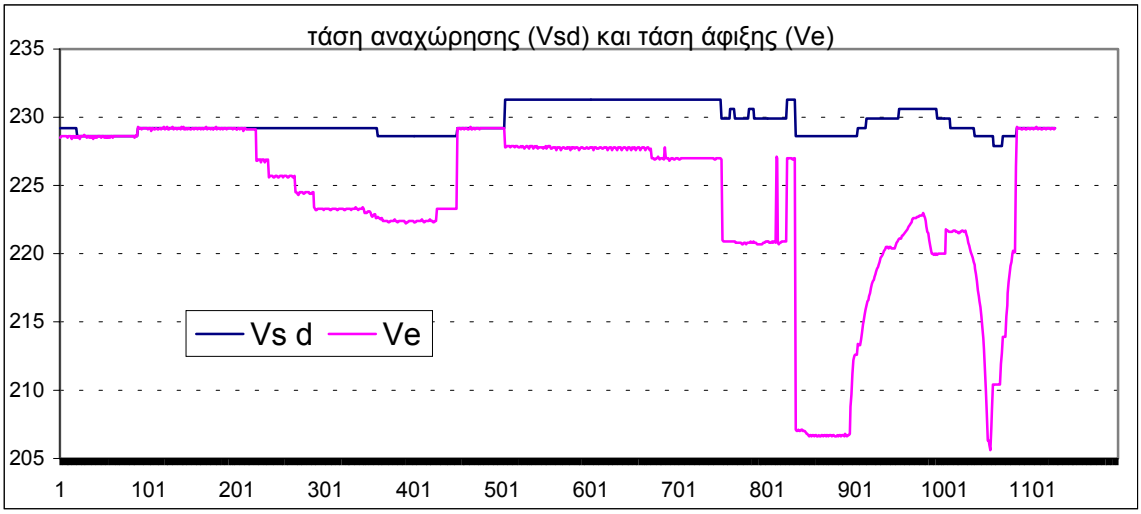
Δεδομένης της θετικής κλίσης του στατισμού της τάσης, αυτό που καθορίζει την πτώση τάσης είναι το ρεύμα της γραμμής, οπότε με μεγάλα φορτία (600W – λάμπες), παρατηρείται μεγάλη πτώση τάσης. Η σύνδεση όμως του κινητήρα προκαλεί ροή επαγωγικής άεργου ισχύος, οπότε η τάση εξόδου του αντιστροφέα ανυψώνεται. Έτσι η τάση εξόδου δεν πέφτει κάτω από τα 226,2V.

5.6.3 Θετικές Κλίσεις. (DroopV=+6%/Qnom, Droopf=+1Hz/Pnom)

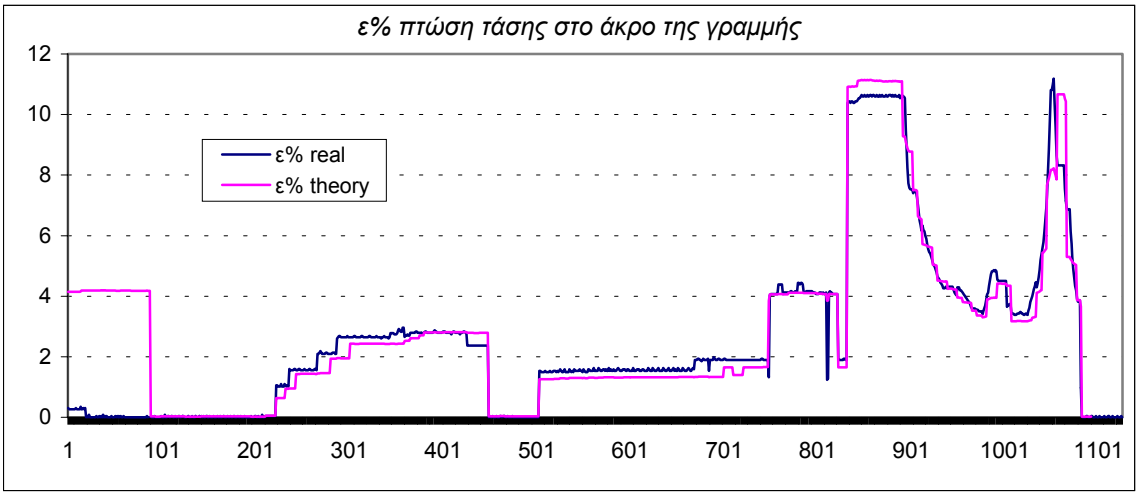
Πορεία πειράματος:

- Αρχικά δίνουν μόνο τα φωτοβολταϊκά ισχύ (0,85KW)
- 60δευτ: αποσύνδεση φ/β
- 180δευτ: σταδιακή σύνδεση λαμπτήρων πυράκτωσης **(η συχνότητα αρχίζει να ανεβαίνει)**
- 318δευτ: έχουν συνδεθεί όλοι οι λαμπτήρες πυρακτώσεως
- 330δευτ: σταδιακή σύνδεση ηλεκτρονικών λαμπτήρων **(η συχνότητα ανεβαίνει αλλά η τάση μειώνεται λίγο)**
- 400δευτ: έχουν συνδεθεί όλες οι ηλεκτρονικές λάμπες
- 410δευτ: αποσύνδεση όλων των φορτίων σταδιακά
- 450δευτ: καθόλου φορτία
- 500δευτ: σύνδεση μόνο κινητήρα (απορρόφηση 361VAR και 220W). **Η τάση ανεβαίνει στην αναχώρηση και άφιξη της γραμμής (Vs=233,1V, Ve=227,8V)**

- 663δευτ: σύνδεση ηλεκτρονικών λαμπτήρων (μείωση προσφερόμενης αέργου ισχύος στα 220VAR)
- 718δευτ: σύνδεση λαμπτήρων πυρακτώσεως (Ve=220V)
- 827δευτ: αποσύνδεση λαμπτήρων πυρακτώσεως, σύνδεση ωμικών αντιστάσεων (ρεύμα 6A)
- 986δευτ: αποσύνδεση κινητήρα (μόνο αντιστάσεις)
- 1000δευτ: μείωση αντίστασης και τελικά αποσύνδεση όλων των φορτίων



Και σε αυτό το πείραμα παρατηρούμε ότι η σύνδεση ενός σημαντικού επαγωγικού φορτίου, όπως ο κινητήρας, προκαλεί ανύψωση της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Η μεταβολή αυτή αντισταθμίζει την μεγάλη μείωση της τάσης που θα είχαμε στο άκρο της γραμμής αν η τάση δεν ανυψωνόταν. Σύνδεση των ηλεκτρονικών λαμπτήρων (663sec) προκαλεί μείωση της απορροφούμενης άεργου ισχύος με αποτέλεσμα να πέφτει η τάση. Η σύνδεση μεγάλου ωμικού φορτίου προκαλεί μεγάλο ρεύμα, με αποτέλεσμα την μείωση της τάσης στο άκρο της γραμμής (αυξημένες ωμικές απώλειες στην γραμμή) αλλά όχι και του αντιστροφέα. Αποσύνδεση του κινητήρα ναι μεν μειώνει τις ωμικές απώλειες αλλά ρίχνει και την τάση στον αντιστροφέα.



Πτώση τάσης στο άκρο της γραμμής υπολογιζόμενη με τους δύο τύπους:

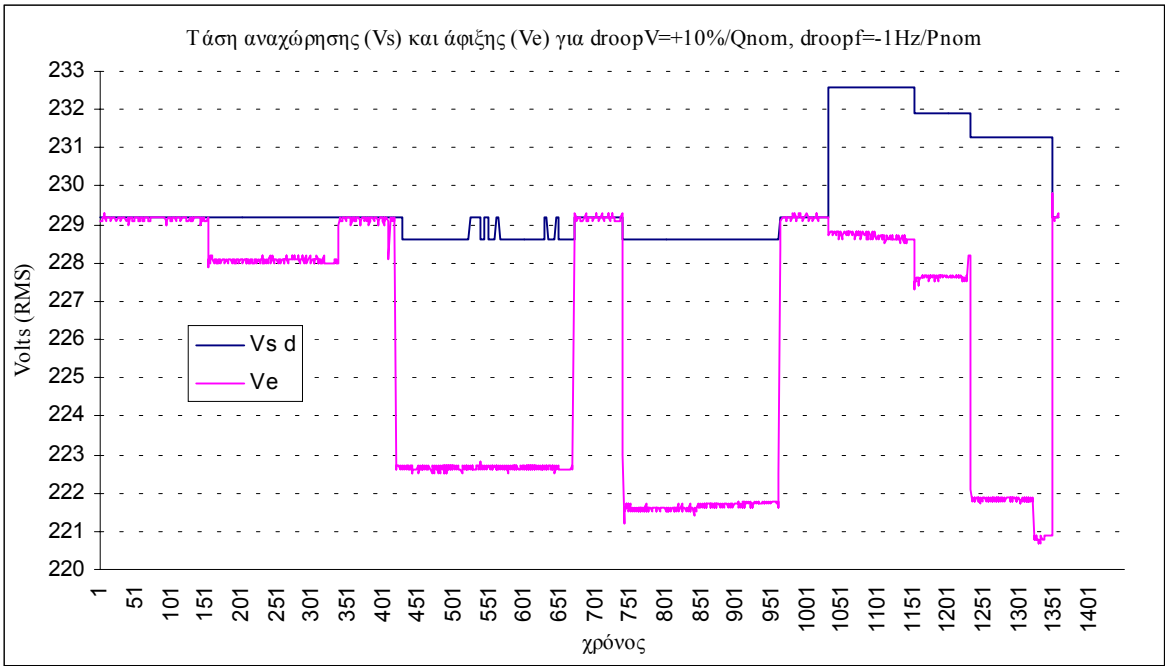
$$\varepsilon\%\text{real} = \frac{V0 - V1}{V1} \cdot 100 = \frac{Vsd - Ve}{Ve} \cdot 100 \quad \textbf{και} \quad \varepsilon\%theory = \frac{100}{Ve^2} \cdot \left(R \cdot P + X \cdot Q\right)$$

5.6.4 Θετικές κλίσεις (DroopV=+10%/Qnom, Droopf=-1Hz/Pnom)

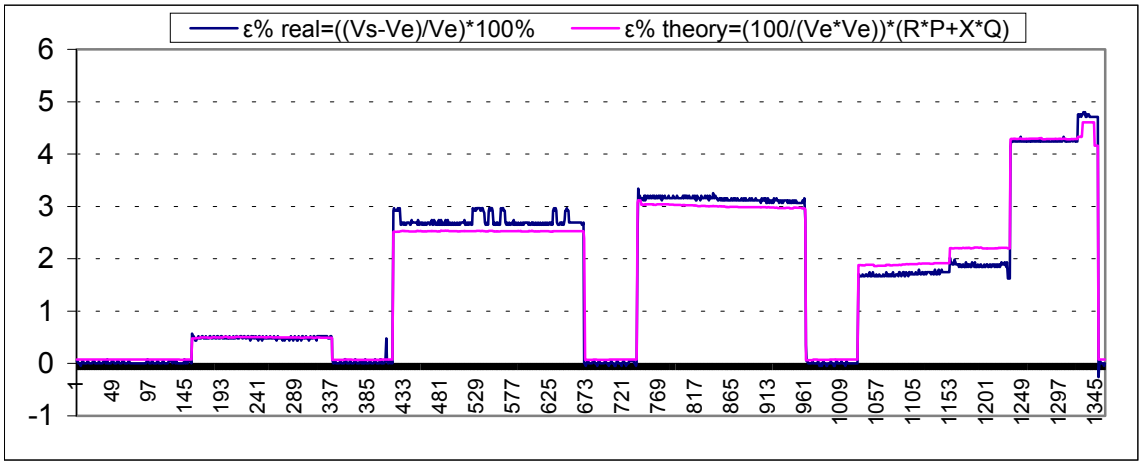
Απομονωμένη λειτουργία (χωρίς φ/β), V_0=230V, f_0=50Hz

Πορεία πειράματος:

- Αρχικά καθόλου φορτία (μηδενική ενεργός και άεργος ισχύς)
- 150δευτ: σύνδεση ηλεκτρονικών λαμπτήρων (P=75W, Q=-53VAR)
- 340δευτ: αποσύνδεση ηλεκτρονικών λαμπτήρων
- 420δευτ: σύνδεση λαμπτήρων πυρακτώσεως
- 670δευτ: αποσύνδεση όλων των φορτίων
- 740δευτ: σύνδεση όλων των λαμπτήρων (P=600W, Q=-58VAR)
- 960δευτ: αποσύνδεση όλων
- 1030δευτ: σύνδεση μόνο κινητήρα (P=212W, Q=379VAR)
- 1150δευτ: σύνδεση ηλεκτρονικών λαμπτήρων (P=307W, Q=319VAR)
- 1230δευτ: αποσύνδεση ηλεκτρονικών, σύνδεση λαμπτήρων πυρακτώσεως



Η σύνδεση του κινητήρα προκαλεί ανύψωση της τάσης, με αποτέλεσμα η πτώση τάσης στο άκρο της γραμμής να αντισταθμίζεται. Ωστόσο, τα ωμικά φορτία επιδρούν περισσότερο.

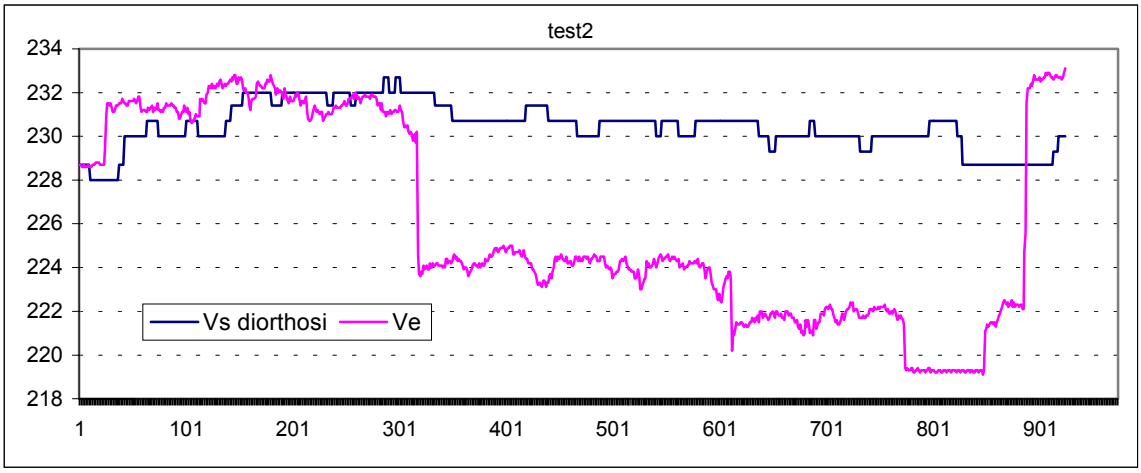


5.6.5 Διασυνδεδεμένη λειτουργία, αρνητικές κλίσεις (DroopV=-6%/Qnom) Droopf=-1Hz/Pnom

Στο πείραμα αυτό μετράμε την πτώση τάσης στο άκρο της γραμμής, έχοντας το μικροδίκτυο σε σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο, για την σύγκριση των δύο περιπτώσεων.

Πορεία πειράματος:

- διασύνδεση χωρίς φορτίο (τα φ/β δίνουν ισχύ 500W)
- σύνδεση διαδοχικά λαμπτήρων (πρώτα ηλεκτρονικών μετά και πυρακτώσεως)
- σύνδεση κινητήρα
- αποσύνδεση από το δίκτυο (απομονωμένη λειτουργία)
- επανασύνδεση με το δίκτυο
- αποσύνδεση φορτίων

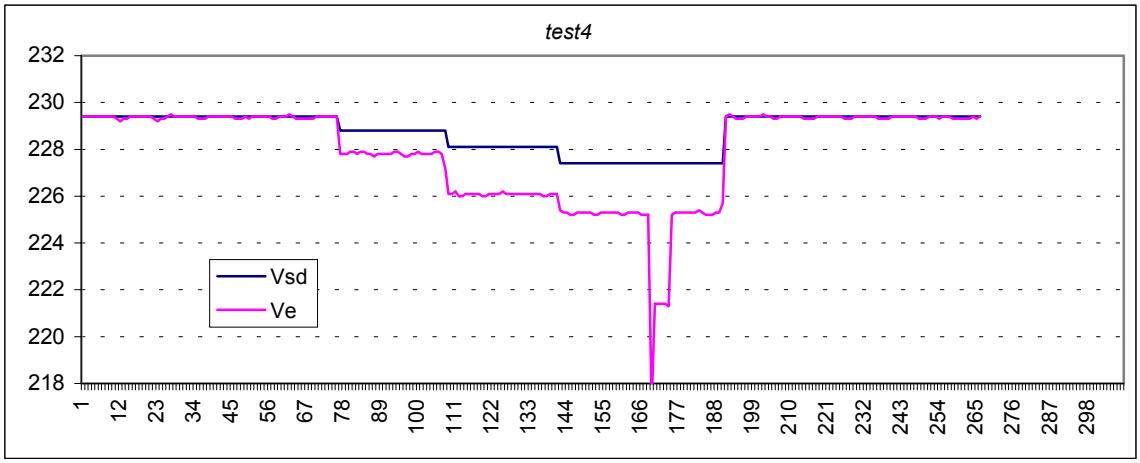


Διασυνδεδεμένη λειτουργία. Η τάση αναχωρήσεως καθορίζεται ουσιαστικά από το δίκτυο, και παραμένει σταθερή. Η κλίση ΔV/ΔQ του αντιστροφέα δεν παίζει κανένα ρόλο στην πτώση τάσης, αλλά μόνο στην άεργο ισχύ που ανταλλάσσει με το δίκτυο. Πρακτικά η πτώση τάσης στο άκρο της γραμμής καθορίζεται από το ρεύμα που απορροφά το φορτίο.

5.6.6 Αρνητική κλίση droopV=-6%/Qnom, δοκιμές επαγωγικών φορτίων σε απομονωμένη λειτουργία droopf=-1Hz/Pnom

Εξέλιξη πειράματος:

- Σταδιακή εισαγωγή πηνίων (ρεύμα μέχρι 2,5A)
- 50δευτ: εισαγωγή κινητήρα
- 60δευτ: αποσύνδεση όλων των φορτίων

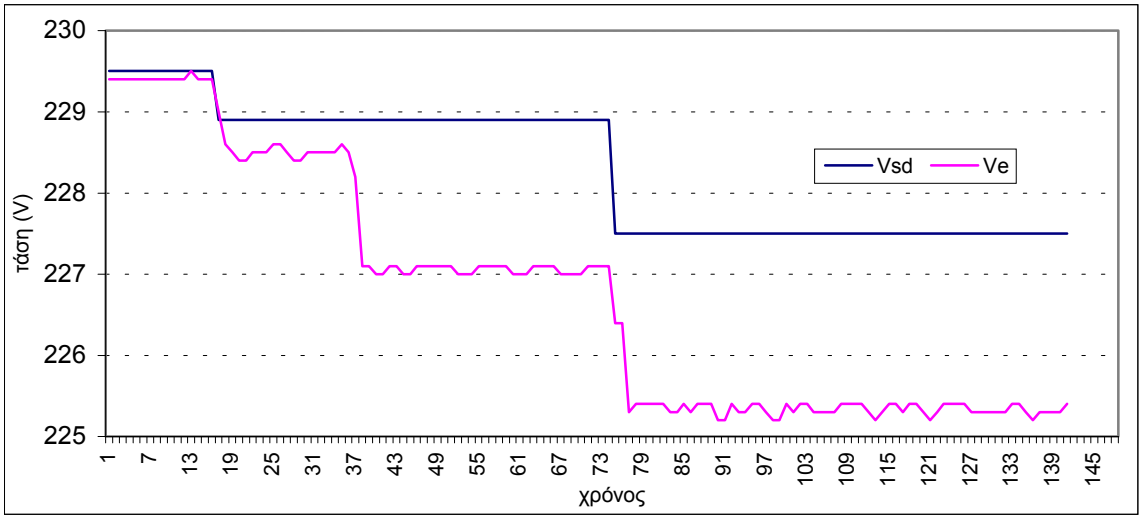


Με αρνητική κλίση στατισμού της τάσης, τα επαγωγικά φορτία μειώνουν την τάση του αντιστροφέα κατά συνέπεια και την τάση στο άκρο της γραμμής.

5.6.7 Αρνητική κλίση droopV=-6%/Qnom, δοκιμές μόνο επαγωγικών φορτίων droopf=-1Hz/Pnom

Εξέλιξη πειράματος:

- Σταδιακή σύνδεση πηνίων μέχρι 2,4A.

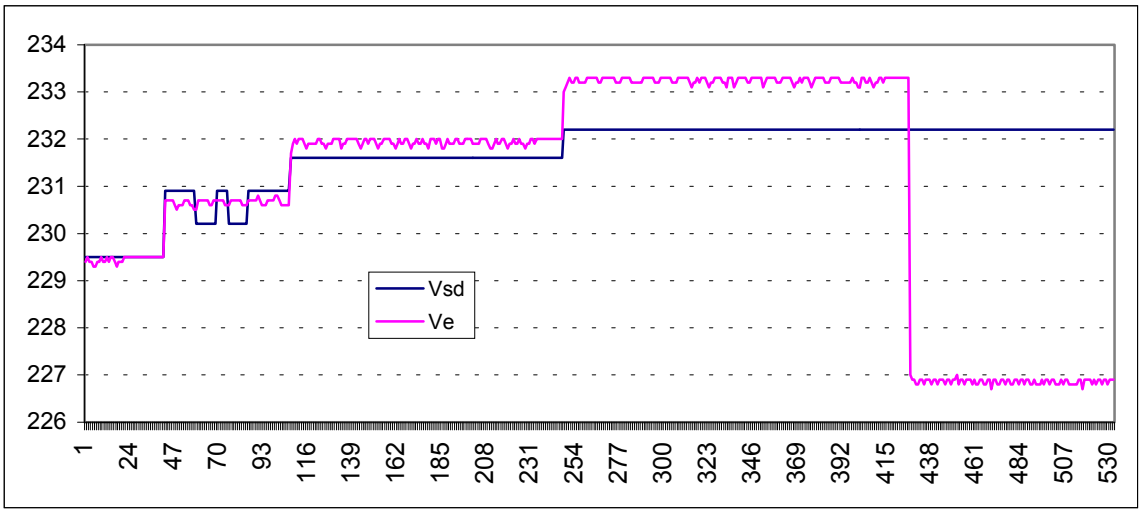


Πτώση τάσης που προκαλείται στην αναχώρηση της γραμμής από την αρνητική κλίση στατισμού του αντιστροφέα. Επιπλέον στην άφιξη της γραμμής υπάρχει πρόσθετη πτώση τάσης λόγω της αντίστασης της γραμμής.

5.6.8 Αρνητική κλίση droopV=-6%/Qnom, δοκιμές χωρητικών φορτίων droopf=-1Hz/Pnom

Εξέλιξη πειράματος:

- αρχικά χωρίς φορτία
- 60δευτ: σταδιακή σύνδεση πυκνωτών (ρεύμα μέχρι 2A)
- 420δευτ: σύνδεση λαμπτήρων πυρακτώσεως (543W)



Με αρνητική κλίση του στατισμού της τάσης, τα χωρητικά φορτία αυξάνουν την τάση του αντιστροφέα. Αξιοσημείωτο είναι ότι, η τάση στο άκρο της γραμμής (Ve άφιξη) γίνεται μεγαλύτερη από την τάση αναχώρησης (Vsd), αν δεν υπάρχουν καθόλου ωμικά φορτία. Με την είσοδο των λαμπτήρων πυράκτωσης (420δευτ), η τάση στο άκρο της γραμμής πέφτει απότομα.

5.7 Μέτρηση πτώσης τάσης σε γραμμή διανομής με σύνθετη αντίσταση R=1,2Ω, X=0.22Ω

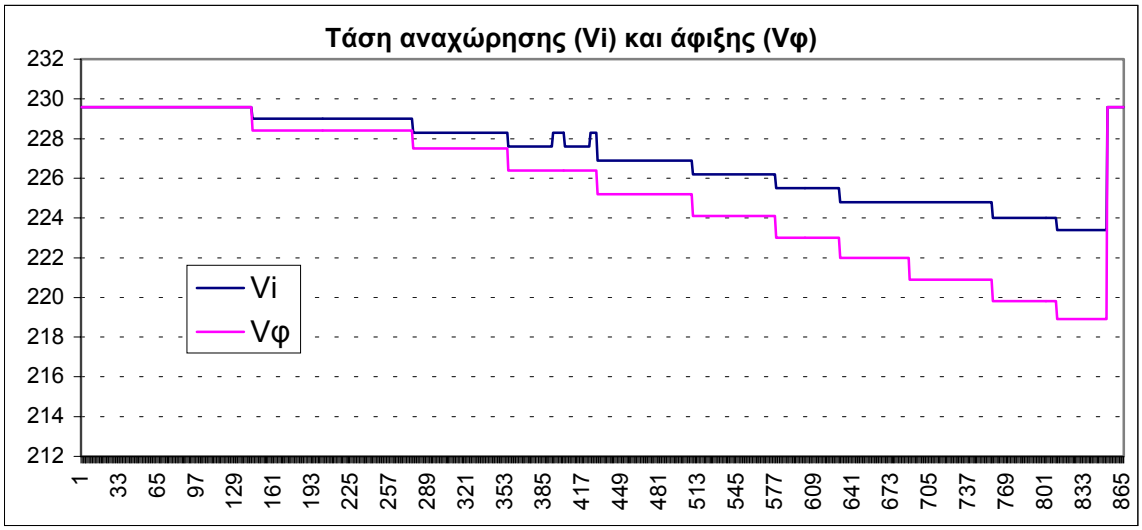
Στο πείραμα αυτό συνδέουμε ανά δύο τους τέσσερις αγωγούς του καλωδίου, οπότε έχουμε τη μισή αντίσταση από το προηγούμενο πείραμα, δηλ. 1,2Ω. Για την μείωση της επαγωγής διαμορφώνουμε έτσι το καλώδιο ώστε να μετρήσουμε συνολική επαγωγή ανά αγωγό L=365μH ή $X=2\pi\nu L=100\pi*365*10^{-6}=0.11\Omega$ άρα στους δύο αγωγούς της γραμμής έχουμε X=0.22Ω. Η γραμμή αυτή αντιστοιχεί σε 1km εναέριου καλωδίου Al 4*16mm^2.

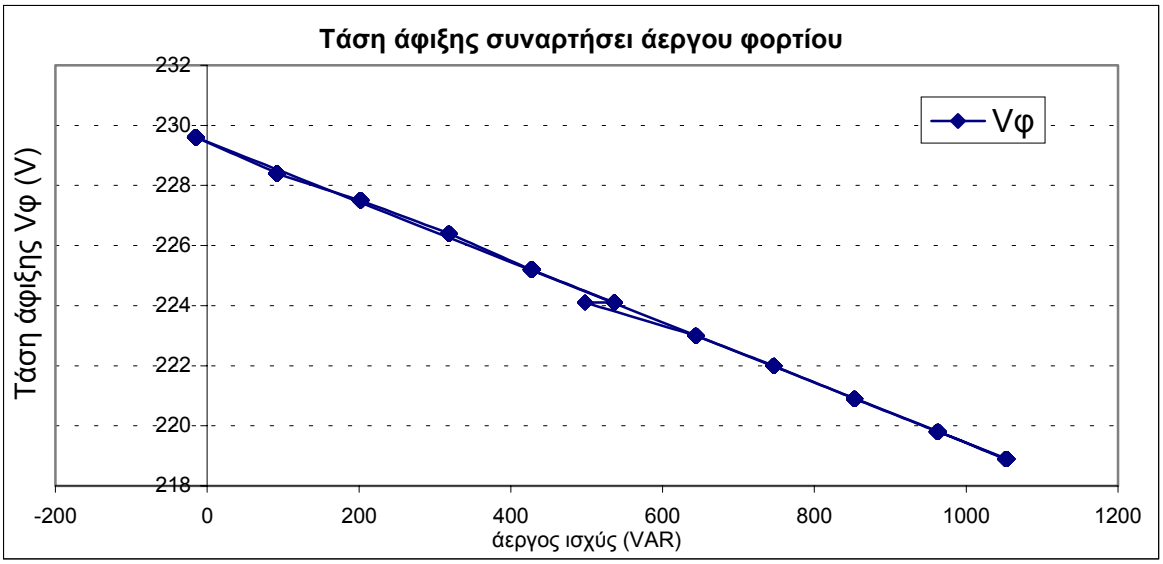
Όλα τα πειράματα γίνονται σε απομονωμένη λειτουργία του μικροδικτύου και αποσυνδεμένο τον αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών, έτσι ώστε μοναδική πηγή ενέργειας να είναι ο αντιστροφέας sunny island. Επαναλαμβάνουμε ότι η τάση ανοιχτοκύκλωσης που μετριέται από τον αντιστροφέα σε κενό φορτίο είναι E=231V, ενώ με το πολύμετρο Vφ=229,6V. Σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται αντιστάθμιση της διαφοράς αυτής ορίζοντας την τάση αναχώρησης (αντιστροφέα) Vi=229,6V. Σε όλες τις δοκιμές κρατάμε σταθερή την κλίση P-f στην τιμή **droopf=-1Hz/Pnom** και ονομαστική συχνότητα και τάση **f_0=50Hz** και **V_0=230V** αντίστοιχα.

5.7.1 Δοκιμές επαγωγικών φορτίων με droopV=-10%/Qnom

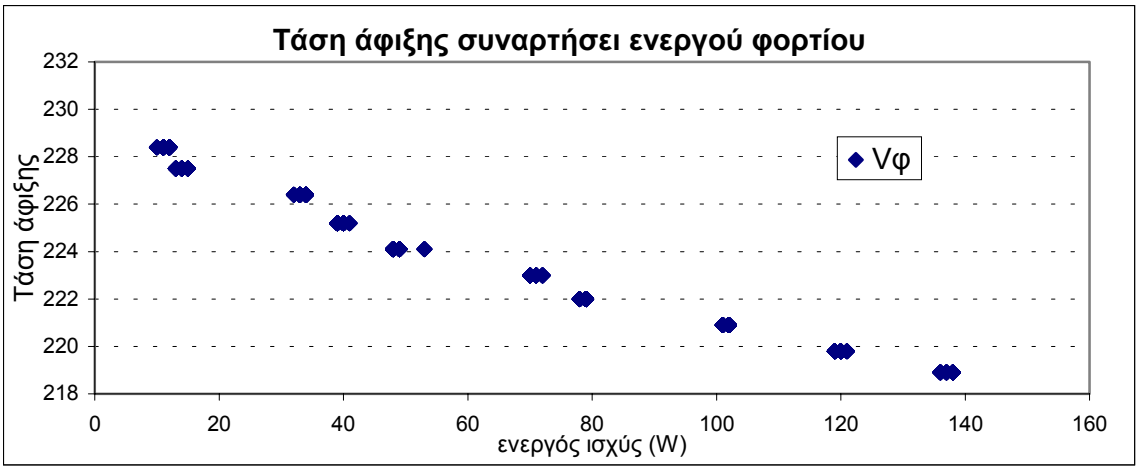
Διαδοχικά συνδέουμε πηνία με βήμα 100VAR, μέχρι ένα φορτίο 1KVAR.

t	f	Pi	E	Vi	Qi	Vφ	Iφ	Pφ	Ploss
0	49.99	-9	231	229.6	-14	229.6	0	-9	0
142	49.96	12	230.4	229	93	228.4	0.4	11.808	0.192
275	49.97	14	229.7	228.3	201	227.5	0.9	13.028	0.972
354	49.94	34	229	227.6	319	226.4	1.4	31.648	2.352
428	49.96	40	228.3	226.9	426	225.2	1.9	35.668	4.332
507	49.95	48	227.6	226.2	536	224.1	2.4	41.088	6.912
582	49.94	71	226.9	225.5	644	223	2.9	60.908	10.092
631	49.93	78	226.2	224.8	747	222	3.3	64.932	13.068
690	49.93	101	226.2	224.8	854	220.9	3.8	83.672	17.328
760	49.93	120	225.4	224	963	219.8	4.3	97.812	22.188
825	49.91	137	224.8	223.4	1053	218.9	4.7	110.492	26.508
858	49.99	-9	231	229.6	-15	229.6	0	-9	0





Η τάση αφίξεως ακολουθεί κατά βάση την τάση αναχωρήσεως. Είναι προφανές ότι αυτή έχει αρνητική κλίση, όπως και η τάση του αντιστροφέα. Υπολογίζοντας ΔV/ΔQ=-0.01. Η κλίση αυτή είναι μεγαλύτερη από την κλίση του αντιστροφέα (-0.007) καθώς μεσολαβεί η επαγωγική αντίδραση σύνδεσης.

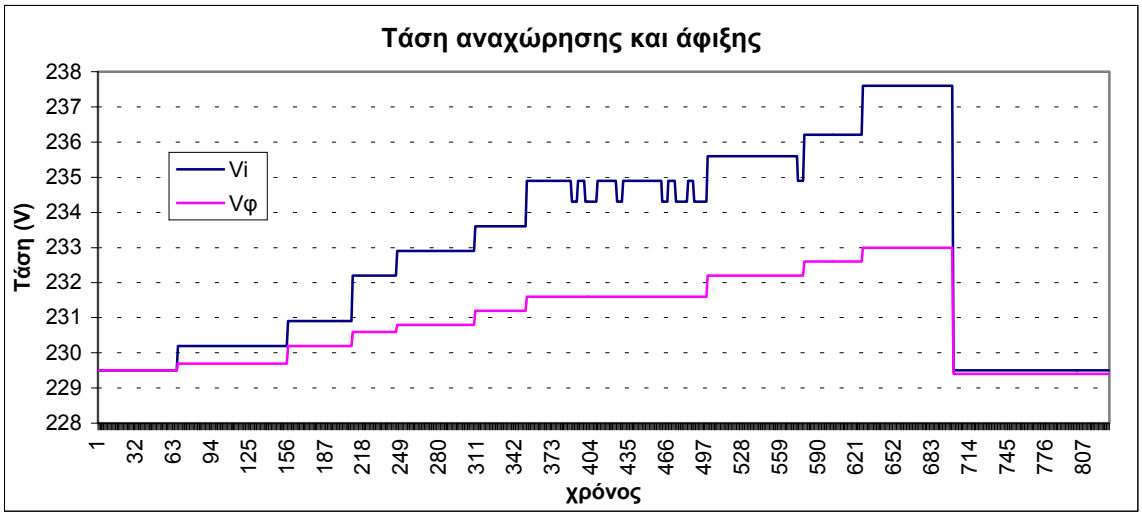


Η τάση αφίξεως (Ve) εξαρτάται και από το ενεργό φορτίο που απορροφάται, καθώς έχουμε πτώση τάσης και λόγω των ωμικών απωλειών (I^2*Rγρ.)

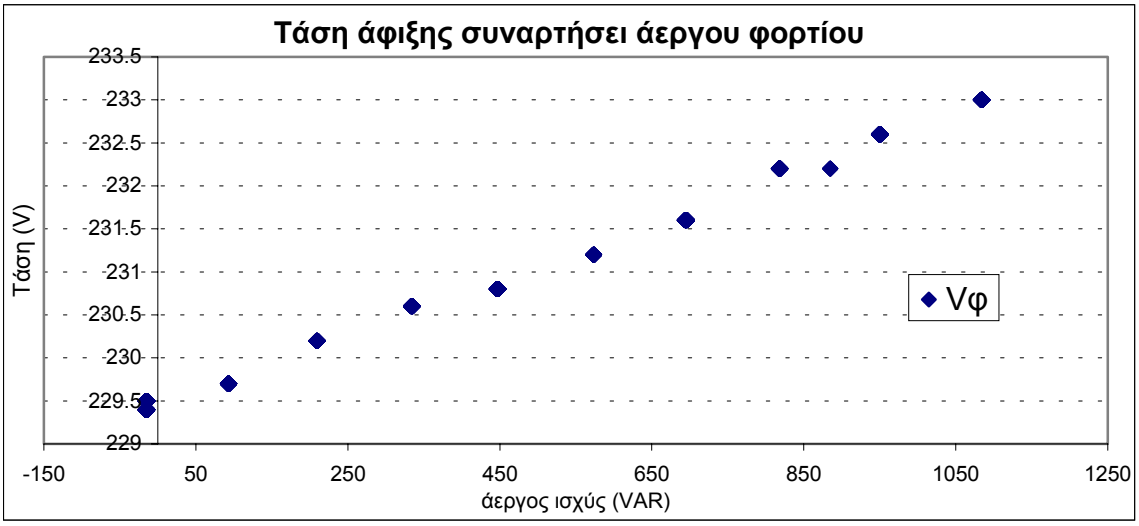
5.7.2 Δοκιμές επαγωγικών φορτίων με: droopV=+10%/Qnom

t	f	Pi	E	Vi	Qi	Vφ	Iφ	Pφ	Ploss
32	49.99	-8	231	229.5	-15	229.5	0	-8	0
114	49.96	12	231.7	230.2	93	229.7	0.4	11.808	0.192
172	49.96	13	232.4	230.9	209	230.2	0.9	12.028	0.972
209	49.96	32	233.7	232.2	334	230.6	1.5	29.3	2.7
267	49.94	44	234.4	232.9	447	230.8	2	39.2	4.8
314	49.94	60	235.1	233.6	573	231.2	2.5	52.5	7.5
483	49.93	74	236.4	234.9	695	231.6	3	63.2	10.8
516	49.93	90	237.1	235.6	818	232.2	3.5	75.3	14.7
594	49.92	111	237.7	236.2	949	232.6	4	91.8	19.2
631	49.92	133	239.1	237.6	1085	233	4.6	107.608	25.392
819	49.99	-9	231	229.5	-15	229.4	0	-9	0

Σταδιακή σύνδεση πηνίων με βήμα 100VAR.



Με θετική κλίση της καμπύλης στατισμού της τάσης (droopV=10%), η τάση του αντιστροφέα (καθώς και η τάση στο άκρο της γραμμής) αυξάνονται. Παρατηρείται μια μικρή κυμάτωση της τάσης (το χρονικό διάστημα 380-500 sec, πλάτους 2V.

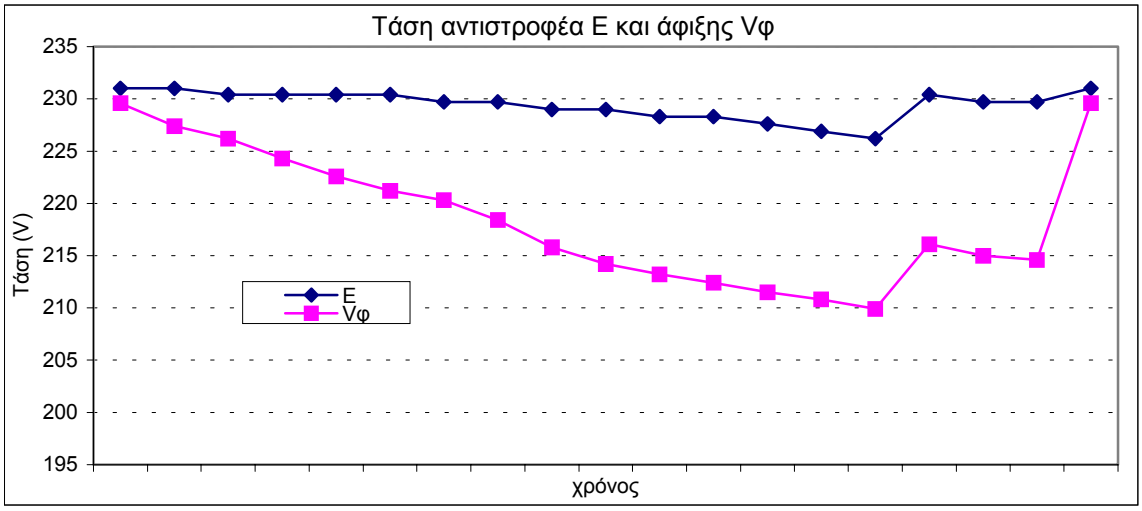


Πιο καθαρά φαίνεται η επίδραση της αέργου επαγωγικής φορτίσεως στην τάση άφιξης της γραμμής. Καθώς εξαρτάται άμεσα και από την τάση αναχωρήσεως (αντιστροφέα) και από το άεργο φορτίο, είναι φανερό ότι έχει ομοίως θετική κλίση (ΔVφ/ΔQ=0.003) με την τάση αναχώρησης (ΔVi/ΔQ=0.007).

5.7.3 Σύνδεση ωμικών-επαγωγικών φορτίων με: droopV=-10%/Qnom

Στο πείραμα αυτό συνδέουμε ταυτόχρονα αντιστάσεις και πηνία, προσπαθώντας να επιτύχουμε ένα συντελεστή ισχύος cosφ=0.8 για τα φορτία, τιμή που συναντάται στα δίκτυα χαμηλής τάσης.

t	f	Pi	E	Vi	Qi	Vφ	Iφ	Pφ	Ploss
4	49.99	-9	231	229.6	-15	229.6	0	-9	0
99	49.92	188	231	229.6	-26	227.4	0.7	187.412	0.588
154	49.9	195	230.4	229	92	226.2	0.9	194.028	0.972
245	49.85	341	230.4	229	94	224.3	1.5	338.3	2.7
439	49.82	459	230.4	229	99	222.6	2	454.2	4.8
535	49.79	575	230.4	229	100	221.2	2.5	567.5	7.5
603	49.79	580	229.7	228.3	204	220.3	2.6	571.888	8.112
654	49.74	719	229.7	228.3	207	218.4	3.2	706.712	12.288
742	49.7	911	229	227.6	206	215.8	4	891.8	19.2
832	49.49	1038	229	227.6	208	214.2	4.5	1013.7	24.3
843	49.49	1039	228.3	226.9	310	213.2	4.65	1013.053	25.947
977	49.48	1044	228.3	226.9	405	212.4	4.8	1016.352	27.648
1057	49.48	1047	227.6	226.2	506	211.5	5.05	1016.397	30.603
1152	49.5	1054	226.9	225.5	600	210.8	5.3	1020.292	33.708
1200	49.49	1060	226.2	224.8	693	209.9	5.5	1023.7	36.3
1253	49.49	1041	230.4	229	4	216.1	4.4	1017.768	23.232
1313	49.49	1040	229.7	228.3	108	215	4.4	1016.768	23.232
1395	49.47	1073	229.7	228.3	108	214.6	4.6	1047.608	25.392
1476	49.87	-10	231	229.6	-15	229.6	0	-10	0

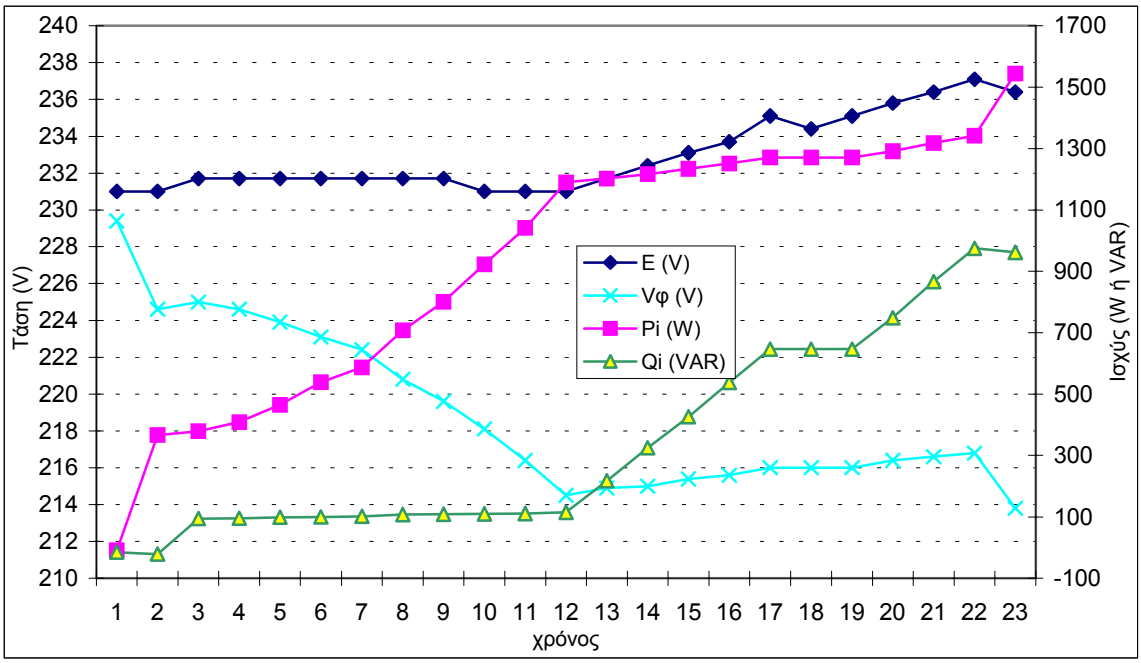


Πτώση τάσης λόγω αντίστασης στην γραμμή διανομής, αλλά και λόγω της μείωσης της τάσης εξόδου του αντιστροφέα με την προσθήκη επαγωγικών φορτίων, λόγω της αρνητικής κλίσης Q-V

5.7.4 Σύνδεση ωμικών-επαγωγικών φορτίων με: droopV=+10%/Qnom

Ομοίως προσπαθούμε σε αυτό το πείραμα να τροφοδοτήσουμε με τον αντιστροφέα sunny island ωμικά- επαγωγικά φορτία επιδιώκοντας συντελεστή ισχύος 0.8 αλλά με θετική κλίση αυτή τη φορά για τον στατισμό της τάσης.

time	f (Hz)	Pi (W)	E (V)	Vi (V)	Qi (VAR)	Vφ (V)	Si (VA)	Iφ (A)	cosφ
3	49.85	-9	231	229.5	-15	229.4	16	0	0
80	49.72	367	231	229.5	-21	224.6	367	1.5	1
141	49.7	379	231.7	230.2	95	225	390	1.6	0.97
189	49.7	409	231.7	230.2	96	224.6	419	1.8	0.976
229	49.68	465	231.7	230.2	99	223.9	455	2	1
279	49.66	539	231.7	230.2	100	223.1	548	2.3	0.98
393	49.63	587	231.7	230.2	102	222.4	597	2.5	0.98
486	49.6	708	231.7	230.2	108	220.8	691	3	0.99
574	49.56	801	231.7	230.2	109	219.6	808	3.4	0.99
683	49.51	923	231	229.5	110	218.1	924	3.9	1
742	49.47	1042	231	229.5	111	216.4	1048	4.4	0.99
808	49.42	1190	231	229.5	115	214.5	1193	5.05	1
878	49.44	1202	231.7	230.2	217	214.9	1222	5.1	0.98
928	49.43	1217	232.4	230.9	325	215	1259	5.3	0.97
1016	49.42	1234	233.1	231.6	426	215.4	1302	5.5	0.95
1077	49.41	1252	233.7	232.2	538	215.6	1360	5.7	0.92
1136	49.43	1271	235.1	233.6	646	216	1422	6	0.89
1137	49.43	1271	234.4	232.9	646	216	1422	6	0.89
1138	49.43	1271	235.1	233.6	646	216	1422	6	0.89
1294	49.4	1291	235.8	234.3	749	216.4	1490	6.2	0.86
1380	49.39	1318	236.4	234.9	867	216.6	1577	6.6	0.83
1435	49.39	1342	237.1	235.6	975	216.8	1658	6.9	0.81
1536	49.33	1544	236.4	234.9	962	213.8	1819	7.6	0.85

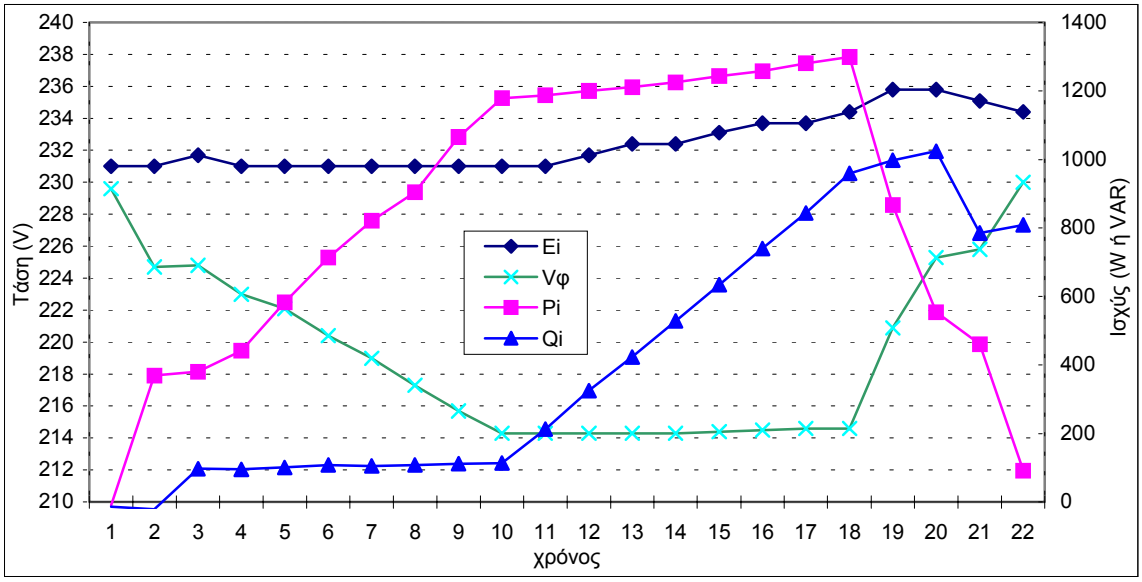


Όπως είναι αναμενόμενο, τα επαγωγικά φορτία (πράσινη γραμμή) αυξάνουν την τάση του αντιστροφέα (μπλε γραμμή) λειτουργώντας με θετική κλίση στατισμού τάσης. Αντίθετα η ενεργός ισχύς (ροζ γραμμή) είναι αυτή που επιδρά περισσότερο στην τάση αφίξεως (γαλάζια γραμμή), λόγω της πτώσης τάσης που προκαλεί το ρεύμα στη γραμμή διανομής.

5.7.5 Σύνδεση ωμικών-επαγωγικών φορτίων με: droopV=+6%/Qnom

Εκτελούμε το ίδιο πείραμα αλλά με κλίση droopV=+6%, ώστε να είναι μικρότερη η επίδραση της αέργου ισχύος στην μεταβολή της τάσης.

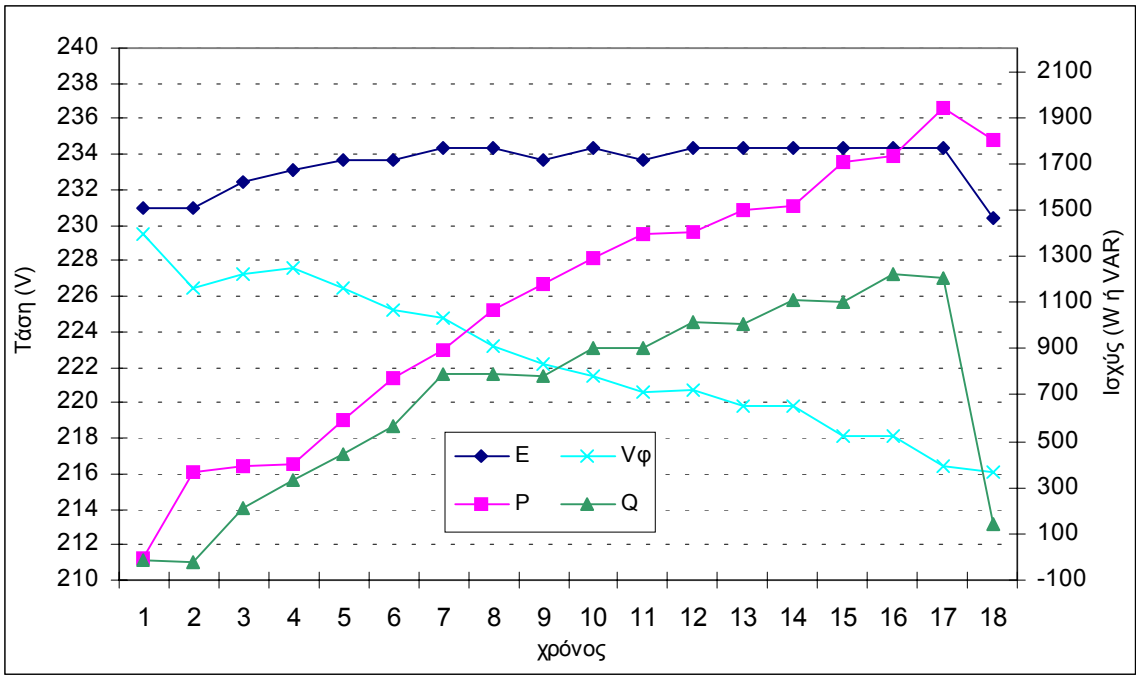
t	f	Pi	Ei	Qi	Vφ	Si	Iφ	Pφ	Ploss	cosφ
7	49.8	-10	231	-14	229.6	18	0	0	0	0.5
91	49.67	369	231	-21	224.7	367	1.5	366.3	2.7	1
221	49.66	380	231.7	97	224.8	392	1.6	376.928	3.072	0.97
291	49.64	442	231	95	223	452	1.9	437.668	4.332	0.98
383	49.59	583	231	101	222.1	592	2.5	575.5	7.5	0.985
397	49.56	714	231	108	220.4	722	3	703.2	10.8	0.99
463	49.53	821	231	105	219	828	3.5	806.3	14.7	0.99
509	49.49	904	231	108	217.3	910	4	884.8	19.2	1
556	49.44	1066	231	112	215.7	990	4.5	1041.7	24.3	1
610	49.41	1179	231	114	214.3	1184	5	1149	30	1
687	49.43	1187	231	213	214.3	1203	5.1	1155.788	31.212	0.987
710	49.43	1200	231.7	325	214.3	1243	5.3	1166.292	33.708	0.965
751	49.41	1211	232.4	423	214.3	1283	5.4	1176.008	34.992	0.94
811	49.41	1225	232.4	529	214.3	1333	5.65	1186.693	38.307	0.93
831	49.39	1243	233.1	634	214.4	1396	5.9	1201.228	41.772	0.89
875	49.39	1258	233.7	740	214.5	1461	6.2	1211.872	46.128	0.86
911	49.38	1281	233.7	844	214.6	1532	6.5	1230.3	50.7	0.83
957	49.37	1299	234.4	959	214.6	1615	6.8	1243.512	55.488	0.8
1041	49.52	867	235.8	998	220.9	1320	5.6	829.368	37.632	0.65
1122	49.62	554	235.8	1024	225.3	1165	4.9	525.188	28.812	0.47
1170	49.66	461	235.1	785	225.8	910	3.9	442.748	18.252	0.5
1210	49.76	92	234.4	809	230	814	3.5	77.3	14.7	0.1



Το μεγάλο ρεύμα των ωμικών φορτίων μειώνει την τάση αφίξεως Vφ. (χρονικές στιγμές 2-10). Με την είσοδο όμως επαγωγικών φορτίων (χρονική στιγμή 10-18), παρατηρείται μια σταθεροποίηση της τάσης του αντιστροφέα και της αφίξεως, παρόλο που το ρεύμα της γραμμής μεγαλώνει, λόγω της επίδρασης της θετικής κλίσης στατισμού της τάσης.

5.7.6 Σύνδεση ωμικών-επαγωγικών φορτίων με:droopV=+6%/Qnom

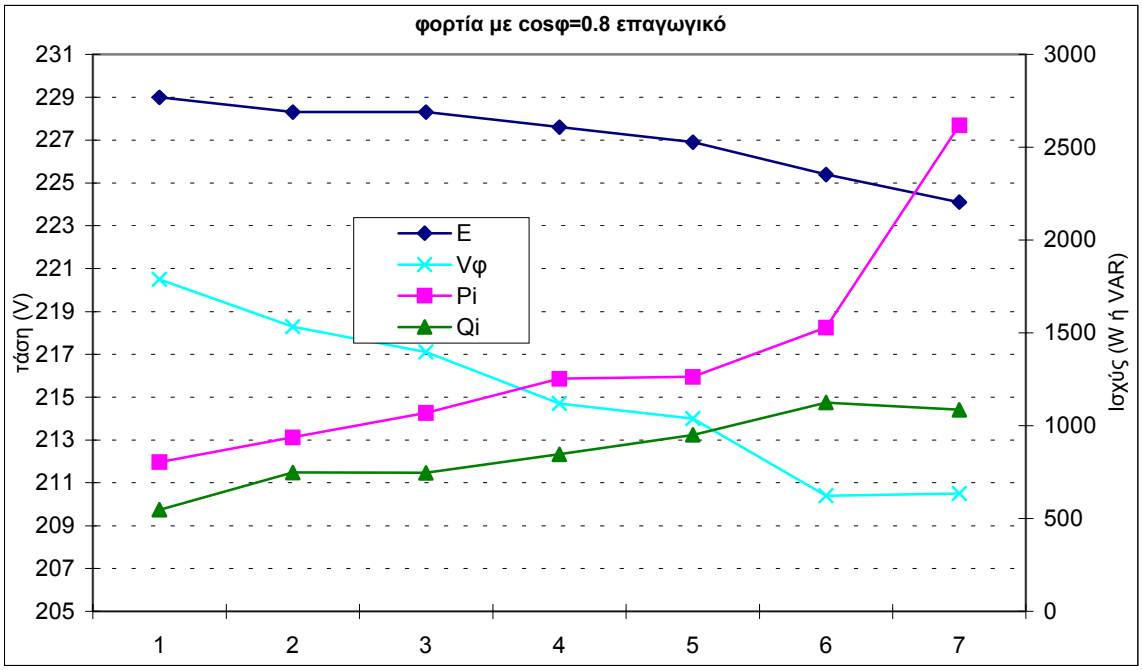
t	f	P	E	Vi	Q	Vφ	Iφ	Pφ	Ploss	cosφ
2	49.91	-8	231	230.9776	-14	229.5	0	-8	0	-0.5
47	49.76	371	231	230.9656	-22	226.5	1.5	368.3	2.7	1
129	49.74	392	232.4	232.7328	209	227.2	1.9	387.67	4.332	0.88
185	49.75	401	233.1	233.6265	332	227.6	2.2	395.19	5.808	0.77
257	49.68	590	233.7	234.4078	447	226.5	3.1	578.47	11.532	0.8
334	49.63	773	233.7	234.6002	568	225.2	4	753.8	19.2	0.81
394	49.59	895	234.4	235.6528	793	224.8	5.1	863.79	31.212	0.75
495	49.55	1071	234.4	235.6483	789	223.2	5.6	1033.4	37.632	0.8
561	49.51	1177	233.7	234.9439	783	222.2	6	1133.8	43.2	0.83
619	49.47	1291	234.4	235.8306	903	221.5	6.65	1237.9	53.067	0.82
677	49.44	1392	233.7	235.1332	901	220.6	7	1333.2	58.8	0.84
732	49.44	1407	234.4	236.0117	1017	220.7	7.3	1343.1	63.948	0.81
773	49.43	1501	234.4	236.0005	1009	219.8	7.6	1431.7	69.312	0.83
832	49.41	1517	234.4	236.1661	1114	219.8	7.9	1442.1	74.892	0.81
927	49.34	1710	234.4	236.1505	1102	218.1	8.6	1621.2	88.752	0.84
954	49.33	1734	234.4	236.3367	1220	218.1	8.9	1638.9	95.052	0.82
1017	49.3	1937	234.4	236.3233	1209	216.4	9.6	1826.4	110.592	0.84
1095	49.31	1801	230.4	230.6519	146	216.1	7.7	1729.9	71.148	1



Σύνδεση φορτίων για επιδιωκόμενο Σ.Ι.=0,8. Λόγω της θετικής κλίσης droopV, η τάση του αντιστροφέα ανυψώνεται με αύξηση της επαγωγικής φορτίσεως. Το ρεύμα της γραμμής (μέγιστο 9,5A) προκαλεί πτώση τάσης περίπου 10volts.

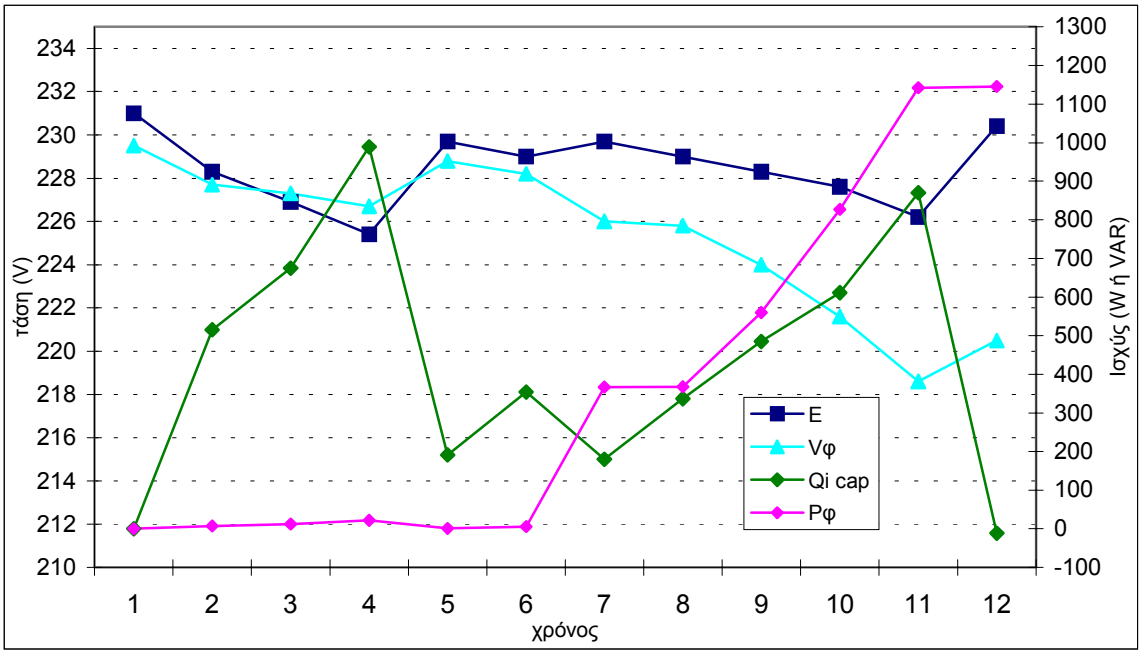
5.7.7 Δοκιμές ωμικών-επαγωγικών φορτίων με: droopV=-6%/Qnom

t	f	Pi	E	Qi	Vφ	Iφ	Pφ	Ploss	cosφ
79	49.61	804	229	547	220.5	4.2	782.832	21.168	0.83
152	49.57	937	228.3	749	218.3	5.2	904.552	32.448	0.78
191	49.53	1069	228.3	746	217.1	5.7	1030.012	38.988	0.82
233	49.47	1254	227.6	846	214.7	6.6	1201.728	52.272	0.83
258	49.47	1264	226.9	951	214	6.9	1206.868	57.132	0.8
292	49.39	1529	225.4	1125	210.4	8.3	1446.332	82.668	0.81
341	49.07	2619	224.1	1086	210.5	12.4	2434.488	184.512	0.92



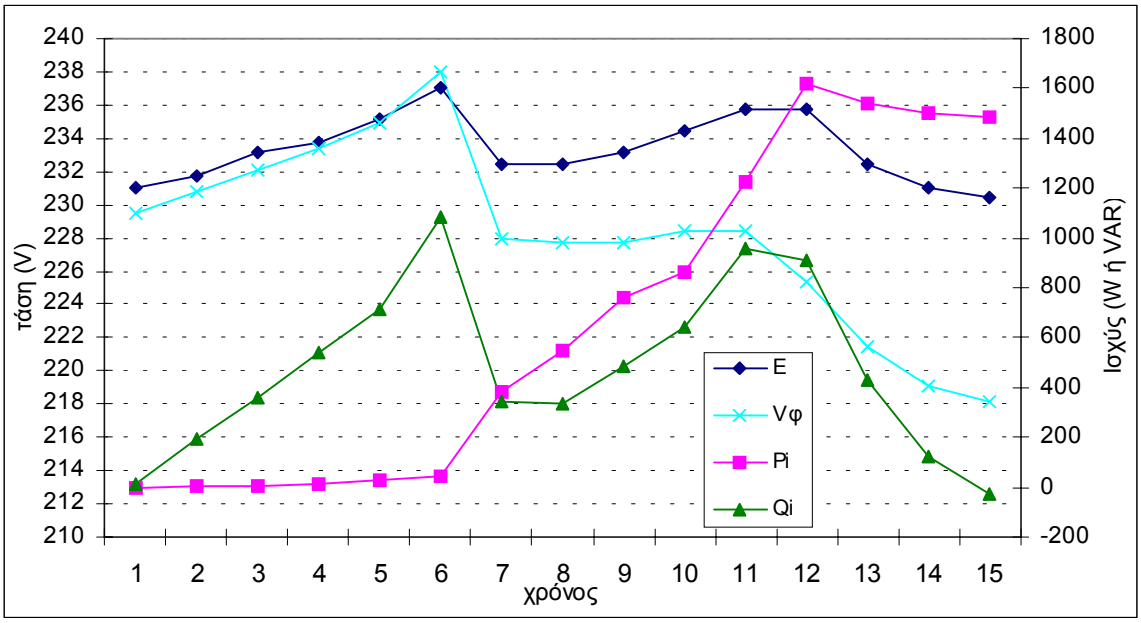
5.7.8 Σύνδεση ωμικών-χωρητικών φορτίων με: droopV=+10%/Qnom

t	f	Pi	E	Qi cap	Vφ	Iφ	Pφ	Ploss	cosφ
0	50	0	231	0	229.5	0	0	0	0
51	49.87	12	228.3	515	227.7	2	7.2	4.8	0
94	49.86	21	226.9	675	227.3	2.7	12.252	8.748	0
143	49.86	41	225.4	989	226.7	4	21.8	19.2	0
236	49.88	1	229.7	191	228.8	0.6	0.568	0.432	0
335	49.86	8	229	354	228.2	1.3	5.972	2.028	0
395	49.74	371	229.7	180	226	1.7	367.532	3.468	0.9
435	49.75	373	229	337	225.8	2	368.2	4.8	0.74
503	49.69	572	228.3	485	224	3.1	560.468	11.532	0.76
581	49.61	850	227.6	611	221.6	4.4	826.768	23.232	0.81
712	49.49	1188	226.2	870	218.6	6.2	1141.872	46.128	0.81
743	49.49	1174	230.4	-11	220.5	4.9	1145.188	28.812	1



5.7.9 Σύνδεση ωμικών-χωρητικών φορτίων με: droopV=-6%/Qnom

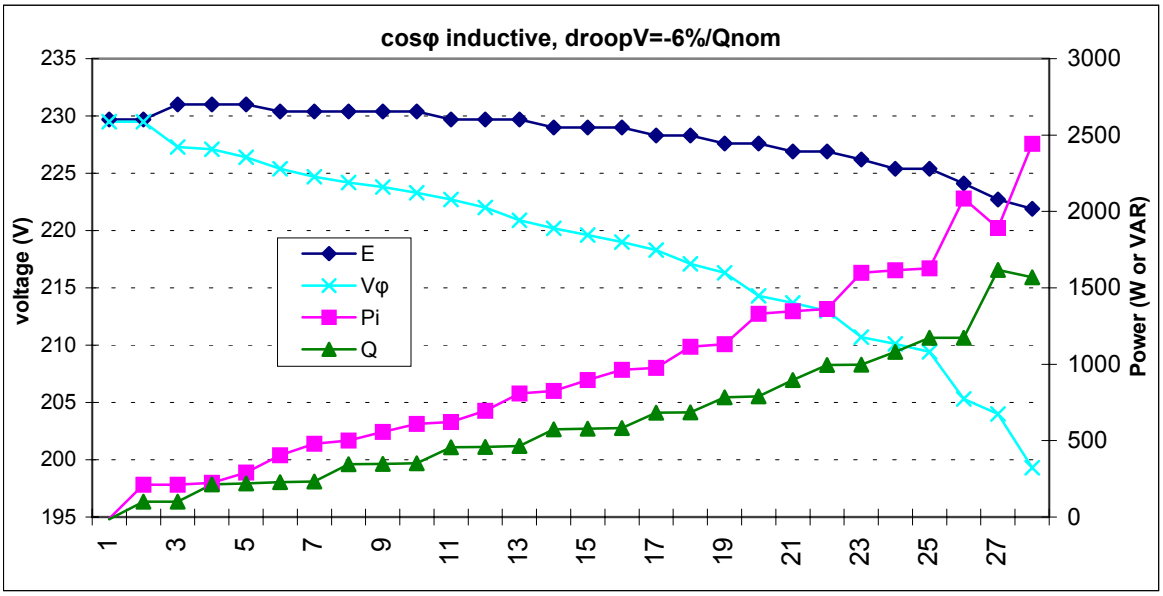
t	f	Pi	E	Qi cap	Vφ	Iφ	Pφ	Ploss	cosφ
8	49.91	0	231	14	229.5	0	0	0	0
41	49.84	1	231.7	192	230.8	0.6	0.568	0.432	0
114	49.86	8	233.1	362	232.1	1.3	5.972	2.028	0
139	49.85	15	233.7	539	233.4	2	10.2	4.8	0
169	49.84	26	235.1	716	234.9	2.8	16.592	9.408	0
207	49.83	45	237.1	1084	238	4.3	22.812	22.188	0
322	49.73	386	232.4	346	227.9	2.1	380.708	5.292	0.75
388	49.69	549	232.4	334	227.7	2.6	540.888	8.112	0.86
449	49.64	757	233.1	486	227.7	3.7	740.572	16.428	0.84
538	49.6	862	234.4	646	228.4	4.4	838.768	23.232	0.8
613	49.49	1226	235.8	956	228.4	6.3	1178.372	47.628	0.79
671	49.38	1617	235.8	907	225.3	7.6	1547.688	69.312	0.87
759	49.41	1542	232.4	428	221.4	6.6	1489.728	52.272	0.96
797	49.41	1500	231	125	219.1	6.3	1452.372	47.628	1
838	49.42	1483	230.4	-23	218.1	6.3	1435.372	47.628	1



Ανύψωση της τάσης Vi του αντιστροφέα λόγω της χωρητικής φορτίσεως. Ομοίως ανυψώνεται και η τάση αφίξεως. Για ένα φορτίο εξόδου 1900VA, η τάση στο άκρο της γραμμής είναι μόνο 4.2V με τιμή αναφοράς τα 230V (πραγματική διαφορά τάσης μεταξύ των δύο άκρων της γραμμής 10.5V).

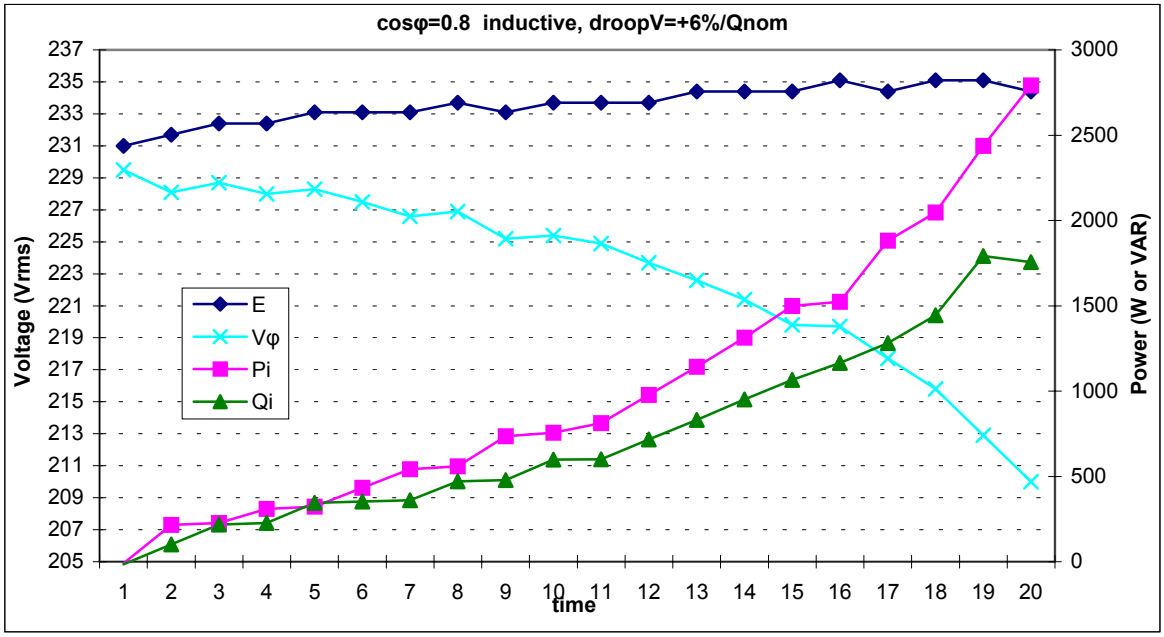
5.7.10 Σύνδεση φορτίων με Σ.Ι. cosφ=0.8 επαγωγικό και droopV=-6%/Qnom

t	f	Pi	E	Qi ind	Iφ	Vφ	Pφ	Ploss	cosφ
15	50	-11	229.7	-14	0	229.5	-11	0	0
58	49.92	212	229.7	101	1	229.5	210.8	1.2	0.9
82	49.91	212	231	101	1	227.3	210.8	1.2	0.91
118	49.92	225	231	213	1.3	227.1	222.972	2.028	0.73
178	49.9	292	231	219	1.6	226.4	288.928	3.072	0.8
238	49.87	404	230.4	228	2	225.4	399.2	4.8	0.87
313	49.83	480	230.4	232	2.3	224.7	473.652	6.348	0.9
333	49.83	501	230.4	345	2.6	224.2	492.888	8.112	0.82
407	49.81	557	230.4	347	2.8	223.8	547.592	9.408	0.85
467	49.8	609	230.4	351	3	223.3	598.2	10.8	0.87
508	49.79	622	229.7	457	3.3	222.7	608.932	13.068	0.81
551	49.76	695	229.7	459	3.6	222	679.448	15.552	0.83
599	49.73	808	229.7	466	4	220.9	788.8	19.2	0.87
748	49.72	825	229	575	4.3	220.2	802.812	22.188	0.82
898	49.72	897	229	578	4.6	219.6	871.608	25.392	0.84
969	49.54	964	229	583	4.8	219	936.352	27.648	0.86
107	49.53	976	228.3	682	5.2	218.3	943.552	32.448	0.82
42	49.48	1114	228.3	686	5.7	217.1	1075.012	38.988	0.85
471	49.48	1131	227.6	784	6	216.3	1087.8	43.2	0.82
579	49.41	1330	227.6	789	6.7	214.3	1276.132	53.868	0.86
614	49.4	1347	226.9	897	7.05	213.7	1287.357	59.643	0.83
660	49.39	1361	226.9	995	7.35	213	1296.173	64.827	0.81
718	49.34	1599	226.2	998	8.2	210.7	1518.312	80.688	0.85
778	49.33	1616	225.4	1081	8.5	210.1	1529.3	86.7	0.83
811	49.31	1627	225.4	1174	8.8	209.4	1534.072	92.928	0.81
892	49.2	2085	224.1	1173	10.5	205.3	1952.7	132.3	0.87
1182	49.25	1891	222.7	1617	11	204	1745.8	145.2	0.76
1211	49.09	2442	221.9	1569	12.9	199.3	2242.308	199.692	0.83



5.7.11 Σύνδεση φορτίων με Σ.Ι. cosφ=0.8 επαγωγικό και droopV=+6%/Qnom

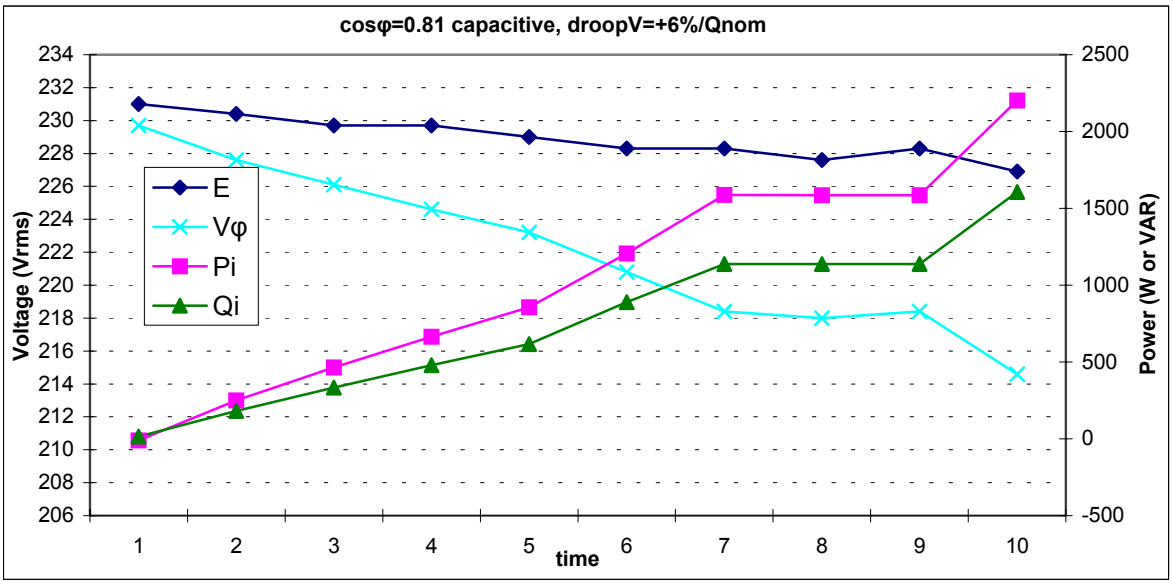
t	f	Pi	E	Qi ind	Ii	Vφ	Pφ	Ploss	cosφ
13	49.82	-9	231	-15	0	229.5	-9	0	-0.53
54	49.73	215	231.7	102	1	228.1	213.8	1.2	0.91
95	49.74	227	232.4	217	1.4	228.7	224.648	2.352	0.72
133	49.71	309	232.4	227	1.7	228	305.532	3.468	0.81
164	49.71	323	233.1	345	2.05	228.3	317.957	5.043	0.68
220	49.68	434	233.1	353	2.4	227.5	427.088	6.912	0.78
283	49.65	542	233.1	360	2.8	226.6	532.592	9.408	0.83
317	49.64	560	233.7	471	3.1	226.9	548.468	11.532	0.76
361	49.59	736	233.1	479	3.7	225.2	719.572	16.428	0.84
406	49.58	756	233.7	599	4.1	225.4	735.828	20.172	0.78
445	49.56	813	233.7	600	4.3	224.9	790.812	22.188	0.8
504	49.51	978	233.7	716	5.1	223.7	946.788	31.212	0.81
577	49.46	1142	234.4	832	6	222.6	1098.8	43.2	0.81
663	49.4	1314	234.4	952	6.8	221.4	1258.512	55.488	0.81
697	49.34	1500	234.4	1066	7.8	219.8	1426.992	73.008	0.81
731	49.35	1524	235.1	1166	8.1	219.7	1445.268	78.732	0.81
853	49.23	1881	234.4	1282	9.3	217.7	1777.212	103.788	0.81
1092	49.19	2047	235.1	1445	10.5	215.8	1914.7	132.3	0.82
1166	49.07	2437	235.1	1792	12.7	212.9	2243.452	193.548	0.81
1205	48.98	2792	234.4	1756	13.9	210	2560.148	231.852	0.85



Η τάση αναχώρησης του αντιστροφέα ανυψώνεται (μέχρι 4Volt) με την αύξηση του επαγωγικού φορτίου. Ωστόσο η πτώση τάσης (I^2*Rγρ.) στη γραμμή έχει ως αποτέλεσμα την μείωση κατά 24Volts στην τάση αφίξεως για ονομαστικό φορτίο εξόδου (3300VA). Έχοντας όμως σαν τάση αναφοράς την ονομαστική 230V, η πτώση τάσης είναι 20V, εξαιτίας της ανύψωσης στην αναχώρηση της γραμμής. Να σημειωθεί ότι η τάση εξόδου του αντιστροφέα στα μεγάλα επαγωγικά φορτία (1756VAR) δεν είναι αυτή που αναμένεται από την θεωρητική εξίσωση αλλά λίγο μικρότερη (234,4V αντί 237,3V).

5.7.12 Σύνδεση φορτίων με Σ.Ι. cosφ=0.8 χωρητικό και droopV=+6%/Qnom

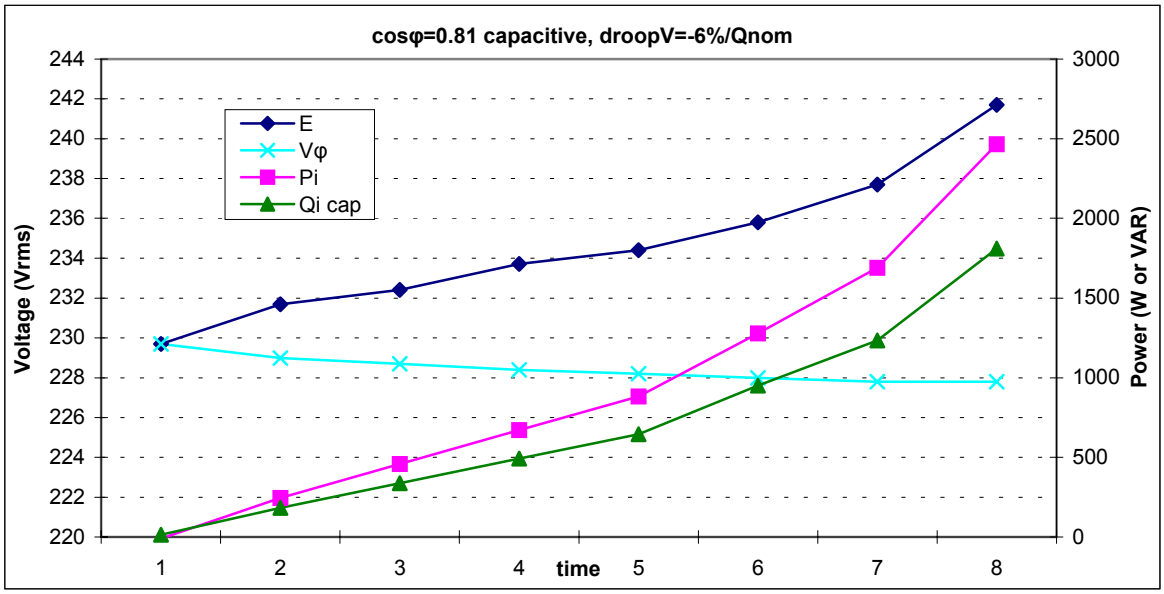
t	f	Pi	E	Qi cap	Iφ	Vφ	Pφ	Ploss	cosφ
15	49.81	-10	231	15	0	229.7	-10	0	-0.53
70	49.72	249	230.4	181	1.2	227.6	179.272	1.728	0.81
195	49.65	465	229.7	333	2.3	226.1	326.652	6.348	0.81
340	49.59	665	229.7	480	3.4	224.6	466.128	13.872	0.81
402	49.54	856	229	617	4.4	223.2	593.768	23.232	0.81
475	49.44	1206	228.3	890	6.3	220.8	842.372	47.628	0.81
743	49.33	1588	228.3	1138	8.2	218.4	1057.312	80.688	0.81
751	49.33	1586	227.6	1137	8.2	218	1056.312	80.688	0.81
756	49.32	1586	228.3	1137	8.2	218.4	1056.312	80.688	0.81
1255	49.14	2202	226.9	1606	11.5	214.6	1447.3	158.7	0.81



Πτώση τάσης 12.3V για συνολικό φορτίο εξόδου (χωρητικού Σ.Ι.) S=2725VA. Παίρνοντας σαν τάση αναφοράς την ονομαστική 230V, η μείωση της τάσης εξόδου προκύπτει ακόμη μεγαλύτερη, δηλ. 15.4V, καθώς τα χωρητικά φορτία μειώνουν την τάση εξόδου του αντιστροφέα λόγω της θετικής κλίσης στατισμού.

5.7.13 Σύνδεση φορτίων με Σ.Ι. cosφ=0.8 χωρητικό και droopV=-6%/Qnom

t	f	Pi	E	Qi cap	Iφ	Vφ	Pφ	Ploss	cosφ
28	49.25	-10	229.7	14	0	229.7	-10	0	0.81
118	49.77	246	231.7	183	1.2	229	244.272	1.728	0.81
250	49.7	459	232.4	337	2.3	228.7	452.652	6.348	0.81
347	49.63	671	233.7	493	3.4	228.4	657.128	13.872	0.81
394	49.56	883	234.4	645	4.4	228.2	859.768	23.232	0.81
496	49.42	1278	235.8	951	6.5	228	1227.3	50.7	0.8
651	49.29	1689	237.7	1235	8.5	227.8	1602.3	86.7	0.81
759	49.05	2466	241.7	1810	12.2	227.8	2287.392	178.608	0.81



Σύνδεση χωρητικών φορτίων με αρνητική κλίση στατισμού προκαλεί αύξηση της τάσης του αντιστροφέα. Η τάση στο άκρο της γραμμής (άφιξη) μειώνεται πολύ λίγο καθώς η πτώση τάσης λόγω απωλειών στην γραμμή αντισταθμίζεται από την αύξηση της τάσης λόγω της επίδρασης της χωρητικής φορτίσεως. Για φορτίο εξόδου 3058VA, έχουμε μείωση μόνο κατά 2V στην τάση εξόδου (από την ονομαστική τάση 230V). Η πτώση τάσης στην γραμμή είναι φυσικά μεγαλύτερη (13.9V). Έτσι, για χωρητικά φορτία στο μικροδίκτυο, η αρνητική κλίση στατισμού της τάσης προκαλεί αντιστάθμιση της πτώσης τάσης στις γραμμές διανομής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το πρωτότυπο μικροδίκτυο του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, αποτελούμενο από φωτοβολταϊκές γεννήτριες, συσσωρευτές και δύο αντιστροφείς ισχύος. Περιγράφηκαν αναλυτικά οι δυνατότητές του και έγιναν εργαστηριακά πειράματα για την καταγραφή της λειτουργίας του. Το συγκεκριμένο μικροδίκτυο, στην παρούσα του μορφή λειτουργεί με βάση τις καμπύλες στατισμού συχνότητας- ενεργού ισχύος και τάσης- αέργου ισχύος, είτε σε απομονωμένη λειτουργία, είτε σε διασυνδεδεμένη με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. *Η συνεργασία μονάδων διανεμημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με τις κλίσεις στατισμού, αποτελεί μέχρι στιγμής τον πιο εξελιγμένο τρόπο παραλληλισμού μονάδων, χωρίς να απαιτείται ξεχωριστός δίαυλος επικοινωνίας*. Ο έλεγχος αυτός αποτελεί μεταφορά των χαρακτηριστικών αρχών λειτουργίας των μεγάλων ηλεκτρικών δικτύων στους αντιστροφείς ισχύος.

Η μετάβαση από την αυτόνομη σε διασυνδεδεμένη λειτουργία και αντίστροφα γίνεται χειροκίνητα και χωρίς καμία διακοπή στην τροφοδότηση των φορτίων. Κυματομορφές κατά τη διάρκεια της σύνδεσης ή αποσύνδεσης με το δίκτυο για διάφορες τιμές τάσης και συχνότητας, επιβεβαιώνουν ότι αυτή η αλλαγή γίνεται ομαλά.

Μονάδες παραγωγής που συνδέονται στο μικροδίκτυο μπορούν να λειτουργούν με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- είτε ως πρόσθετες μονάδες πηγής έντασης, που παρέχουν μόνο ισχύ στην συχνότητα και τάση του μικροδικτύου,
- είτε ως μονάδες που διαθέτουν έλεγχο στατισμού, οπότε παραλληλίζονται βάση αυτών με τον αντιστροφέα των συσσωρευτών για την ρύθμιση της κοινής τάσεως και της συχνότητας του μικροδικτύου, ή παραλληλίζονται βάση αυτών με το κεντρικό δίκτυο.

Βασικές μονάδες ρύθμισης σε αυτόνομη λειτουργία είναι οι δεύτερες.

- Στο μικροδίκτυο που μελετήθηκε ο αντιστροφέας των συσσωρευτών είναι η μοναδική πηγή ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας σε αυτόνομη λειτουργία. Οι τιμές τους καθορίζονται με βάση την άεργο και ενεργό ισχύ εξόδου του, όπως εξάγονται από τις καμπύλες στατισμού Δf/ΔP και ΔV/ΔQ:

$$f = f_0 - (droopf / P_N) \cdot P$$
$$V = V_0 - (droopV\% \cdot V_N / Q_N) \cdot Q$$

- Σε διασυνδεδεμένη με το δίκτυο λειτουργία, ο αντιστροφέας των συσσωρευτών ακολουθεί την τάση και την συχνότητα του δικτύου. Ανταλλάσσει ενεργό ισχύ που προκύπτει από τη διαφορά Δf, μεταξύ της ονομαστικής του συχνότητας f_0 και της συχνότητας του δικτύου f, και άεργο ισχύ που προκύπτει από την διαφορά ΔV, μεταξύ της ονομαστικής του τάσης V_0 και της τάσης ακροδεκτών του V (η οποία εξάγεται από την τάση του δικτύου αν ληφθεί υπ' όψιν η επαγωγή συνδέσεως X, δηλ. $\vec{V} = \vec{V}grid + jX\vec{I}$, όπως προκύπτουν επιλύοντας τις εξισώσεις στατισμού ως προς P και Q αντίστοιχα:

$$P = \frac{(f_0 - f) \cdot P_N}{droopf}$$

$$Q = \frac{(V_0 - V) \cdot Q_N}{droopV\% \cdot V_N}$$

Ο αντιστροφέας λειτουργεί όπως θεωρητικά είναι προγραμματισμένος, ως προς τον έλεγχο της συχνότητας με βάση την ενεργό ισχύ, δίνοντας γραμμικές χαρακτηριστικές εξό-

δου f-P. Παρατηρούνται ωστόσο μεγάλες αποκλίσεις από τις θεωρητικά γραμμικές εξισώσεις στατισμού της τάσης V-Q. Σε αυτό συμβάλλει και η άγνωστη επαγωγή μεταξύ δικτύου και αντιστροφέα.

Σε αυτόνομη λειτουργία, πειράματα τόσο με *αρνητικές* όσο και με *θετικές κλίσεις* στατισμού συχνότητας και τάσης, έδειξαν ομαλή συμπεριφορά του μικροδικτύου και του αντιστροφέα ισχύος των συσσωρευτών. Κάποια αστάθεια της τάσης του αντιστροφέα παρατηρείται σε ορισμένες περιπτώσεις θετικής κλίσης στατισμού τάσης – αέργου ισχύος. Για την ρύθμιση της τάσης σε περίπτωση που χρησιμοποιείται εκτεταμένο δίκτυο χαμηλής τάσης, συνίσταται η χρήση *αρνητικής κλίσης* $\Delta V/\Delta Q$ για μικροδίκτυα στα οποία κυριαρχούν φορτία *χωρητικού συντελεστή ισχύος*, και *θετικής κλίσης* $\Delta V/\Delta Q$ για μικροδίκτυα στα οποία το μέσο φορτίο είναι *επαγωγικού συντελεστή ισχύος*. Στην πρώτη περίπτωση η κλίση του στατισμού πρέπει να είναι κάτω από -6%, για την αποτροπή μεγάλης ανύψωσης της τάσης σε περιπτώσεις έντονων χωρητικών φορτίων.

Στην διασυνδεδεμένη λειτουργία, ο αντιστροφέας συνεργάζεται ομαλά με το κεντρικό δίκτυο ή άλλες μονάδες με έλεγχο στατισμού, όταν ο στατισμός της τάσης είναι *αρνητικός*. Αντίθετα, με *θετικό* στατισμό της τάσης ο αντιστροφέας παρουσιάζει ασταθή συμπεριφορά η οποία και προκαλεί μεγάλη ροή αέργου ισχύος πέραν της ονομαστικής, από ή προς τον αντιστροφέα, ενεργοποιώντας τελικά τους αυτόματους διακόπτες προστασίας.

Παράρτημα Α. Τοπολογίες αντιστροφέων φωτοβολταϊκών και αμφίδρομων αντιστροφέων για φόρτιση – εκφόρτιση συσσωρευτών.

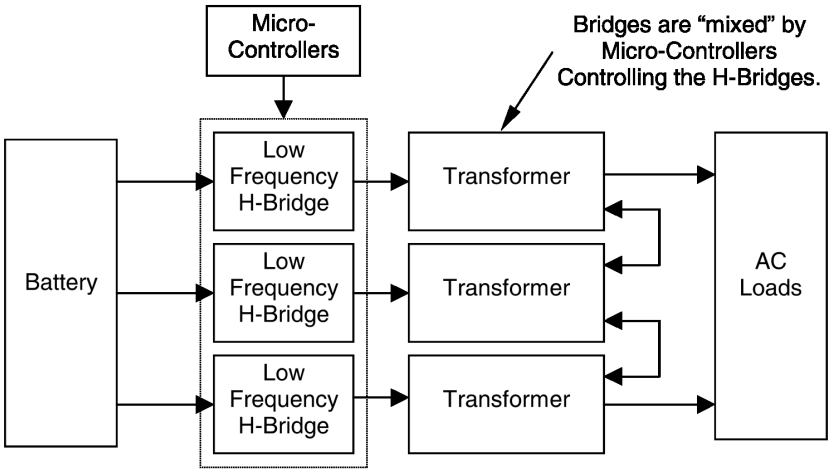


Figure 17, Trace™ SW Series Inverter Simple Block Diagram

Τοπολογία μονοφασικού αμφίδρομου αντιστροφέα της εταιρίας Xantrex, ο οποίος δεν χρησιμοποιεί υψηλές διακοπτικές συχνότητες για την παραγωγή της ημιτονικής τάσης, αλλά ένα συνδυασμό τριών γεφυρών που οδηγούν η κάθε μια ένα μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας. Η ημιτονική κυματομορφή παράγεται από τις γέφυρες που λειτουργούν με χαμηλή διακοπτική συχνότητα, παράγοντας συνολικά 34 έως 52 βήματα τάσης, και στην συνέχεια οδηγούνται στους μετασχηματιστές για ανύψωση. Η συνολική αρμονική παραμόρφωση είναι 4-5% ενώ η απόδοση 85-90% (για ωμικά φορτία).

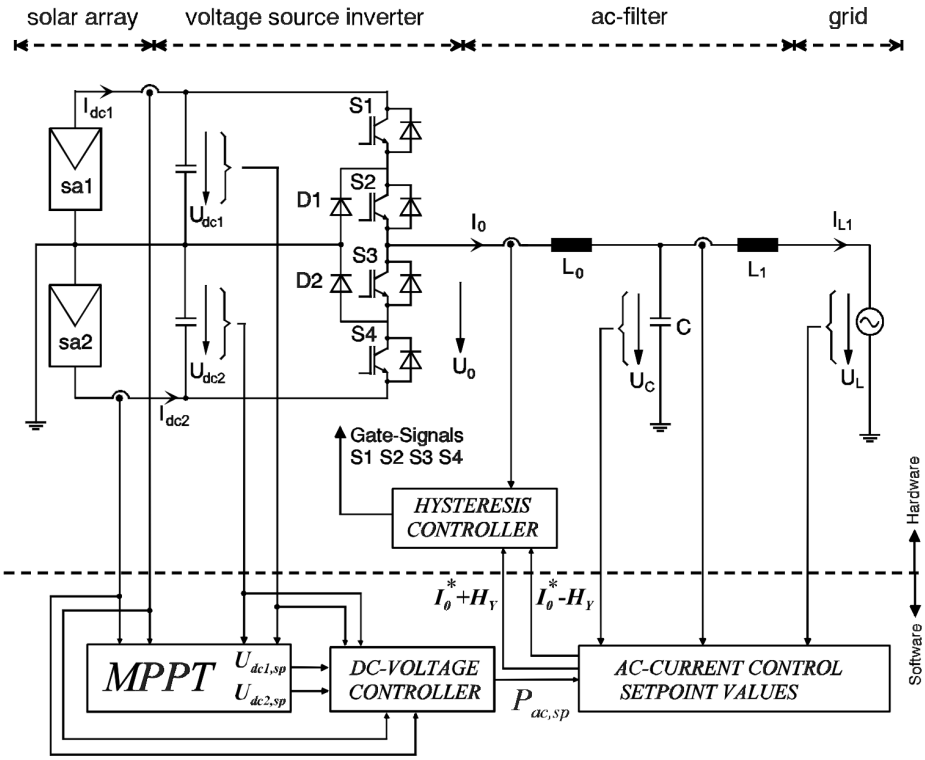


Fig. 2: Three level half bridge without transformer for grid connected pv-systems

Αντιστροφέας πηγής τάσης τριών επιπέδων με ημιγέφυρες για την διασύνδεση φωτοβολταϊκών στο δίκτυο

1990

to

1995

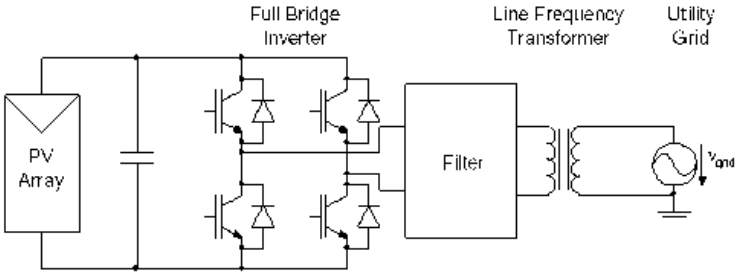


Figure 1: PV inverter with line frequency transformer [10].

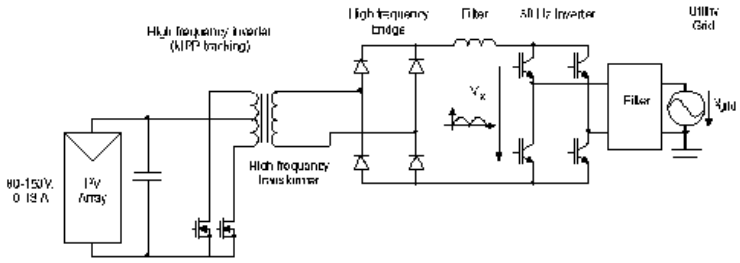
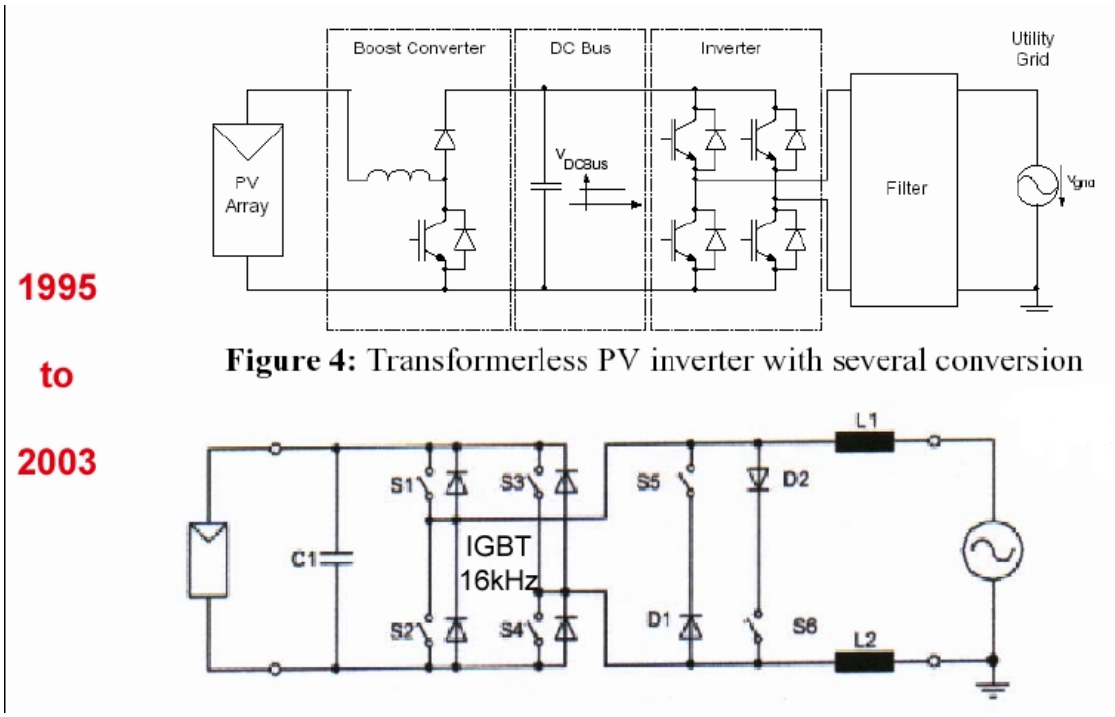


Figure 2: PV inverter with several conversion stages and high frequency transformer [10].

Η εξέλιξη των αντιστροφέων ισχύος με μετασχηματιστή για φωτοβολταϊκά.

Σχήμα 1: Αντιστροφέας με μετασχηματιστή χαμηλής τάσης. Η συνεχή τάση των φωτοβολταϊκών εισέρχεται κατ' ευθείαν στην γέφυρα των θυρίστορ για την παραγωγή PWM Ημιτονικής κυματομορφής. Μετά περνώντας από φίλτρο και μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας (στην τάση του δικτύου), το ρεύμα ρέει στο δίκτυο. Απόδοση έως και 92%

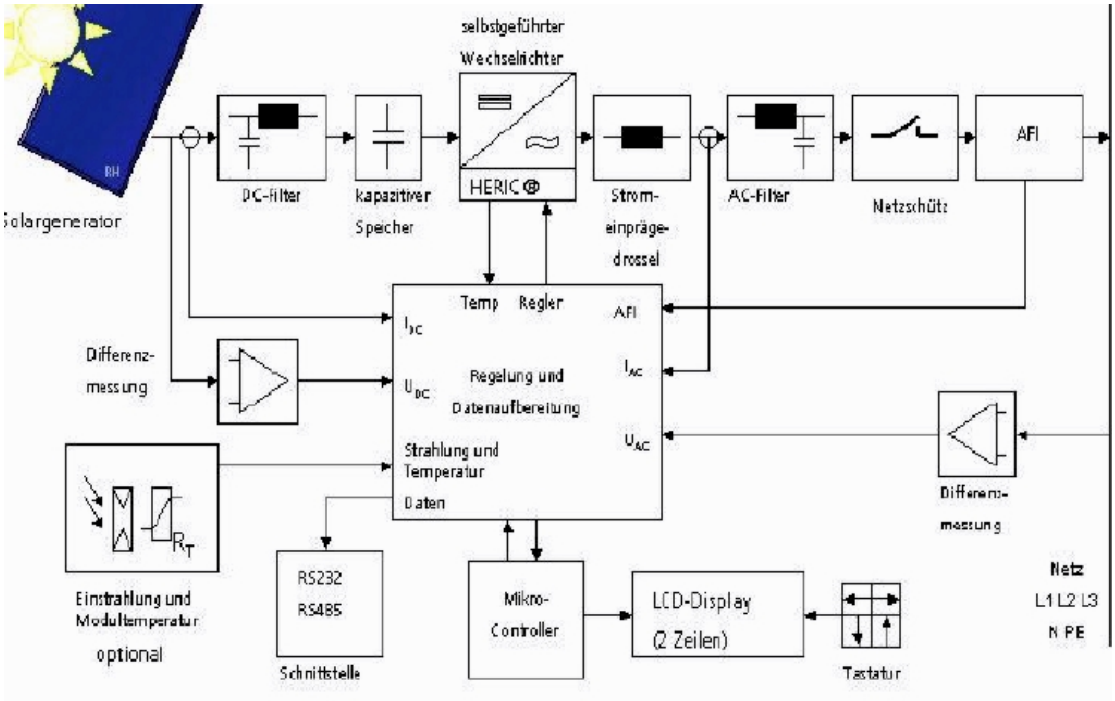
Σχήμα 2. Αντιστροφέας με μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας. Η συνεχής τάση των φωτοβολταϊκών, υποβιβάζεται ή ανυψώνεται με κατάλληλο buck ή boost converter που λειτουργεί με υψηλή συχνότητα της τάξης των KHz σε μια επιθυμητή στάθμη. Η τάση αυτή μετατρέπεται σε καθαρή συνεχή περνώντας από μια γέφυρα τεσσάρων διόδων, και έπειτα με φίλτρα οδηγείται στη γέφυρα PWM. Από τη γέφυρα PWM, το παραγόμενο ημιτονικό ρεύμα στη συχνότητα του δικτύου, συνδέεται απ' ευθείας σ' αυτό. Απόδοση έως και 94%



Η εξέλιξη των αντιστροφέων χωρίς μετασχηματιστή για φωτοβολταϊκά.

Σχήμα 4: Η συνεχή τάση των φωτοβολταϊκών ανυψώνεται ή υποβιβάζεται σε μια ελεγχόμενη στάθμη, και έπειτα εισέρχεται στη γέφυρα PWM για να παραχθεί το ημιτονοειδές ρεύμα. Μέσω φίλτρου το ρεύμα, εγχέεται στο δίκτυο.

Σχήμα 5: Η τοπολογία HERIC, πατέντα της εταιρίας SUNWAYS για τους αντιστροφείς ισχύος. Το συνεχές ρεύμα των φωτοβολταϊκών εισέρχεται σε γέφυρα με IGBT που λειτουργεί σε συχνότητα 16KHz, και στη συνέχεια με άλλα ηλεκτρονικά ισχύος και φίλτρα εγχέεται στο δίκτυο. Απόδοση 97%



Τοπολογία HERIC

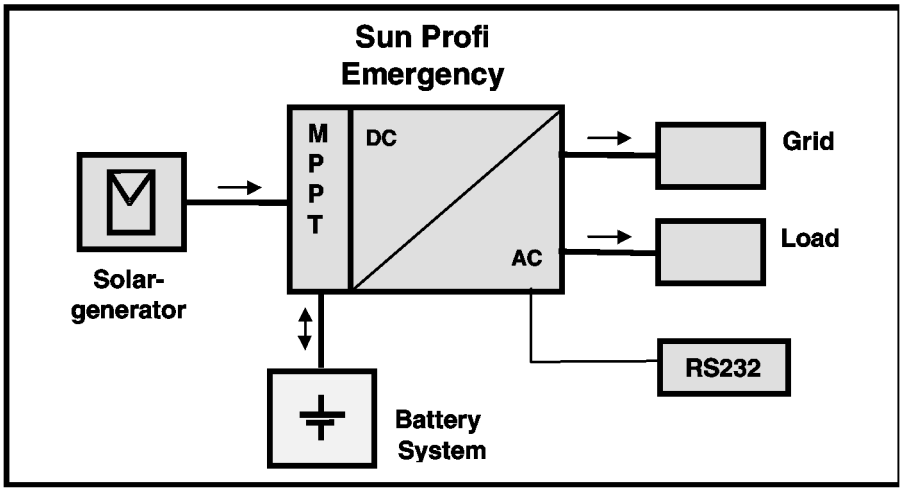
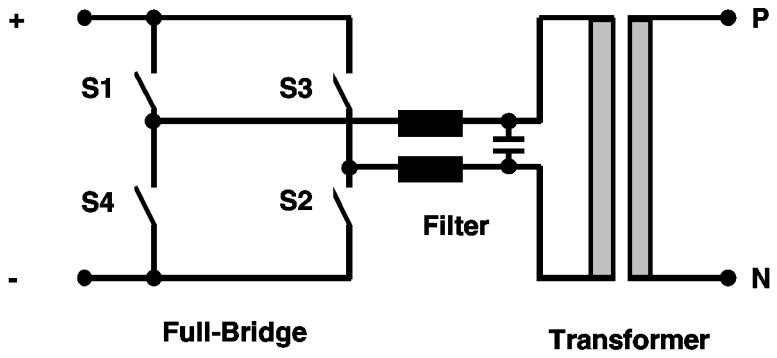


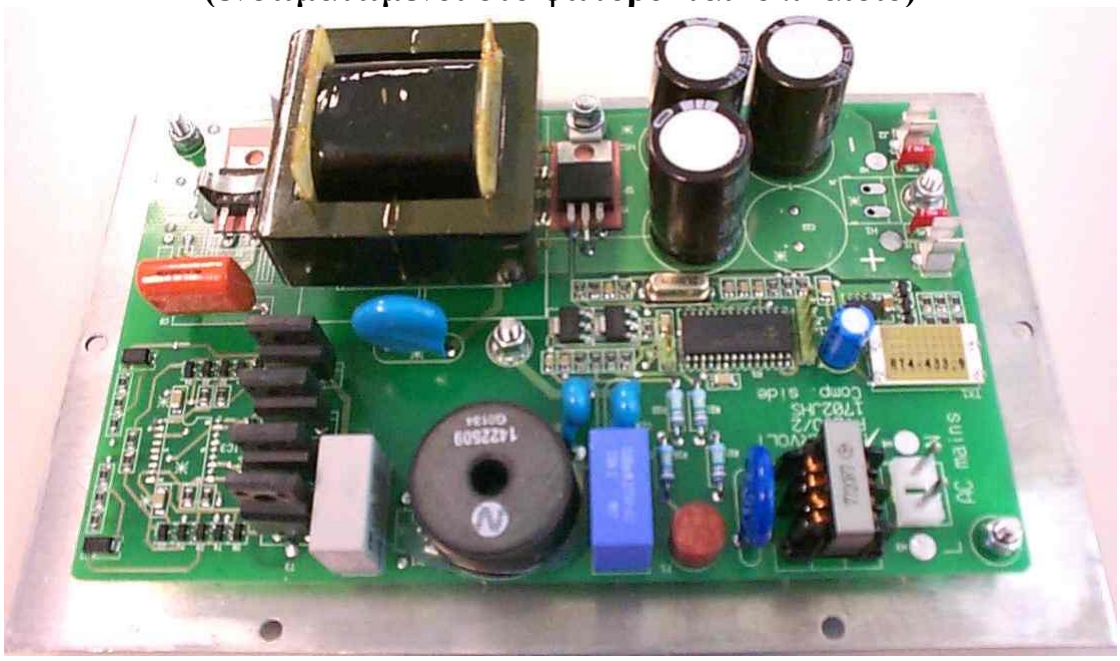
Figure 1 Scheme of PV System with ***Sun Profi Emergency***

Τοπολογία μικτού αντιστροφέα φωτοβολταϊκών και συσσωρευτών Sun Power. Στον αντιστροφέα αυτόν, τα φωτοβολταϊκά και οι συσσωρευτές συνδέονται και τα δύο στην είσοδο του, οπότε λειτουργεί σαν αντιστροφέας συνδεδεμένος στο δίκτυο και σαν φορτιστής συσσωρευτών. Σε περίπτωση διακοπής του δικτύου ο αντιστροφέας μπορεί να παρέχει ενέργεια και από τους συσσωρευτές.



Το βασικό σχεδιάγραμμα του αντιστροφέα, από μια πλήρη γέφυρα MOSFET's, φίλτρα, και μετασχηματιστή απομόνωσης χαμηλής συχνότητας

PV2GO. Αντιστροφείς φωτοβολταϊκών 2ης γενιάς (ενσωματωμένοι στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο)



Κύκλωμα αντιστροφέα δεύτερης γενιάς (ισχύος 100W). Πολύ απλή σχεδίαση για την μείωση του κόστους. Απόδοση 92%.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Όρια αρμονικών τάσης κατά διάφορους οργανισμούς

Χαρακτηριστικό	Κανονική τιμή	Περίοδος Ολοκλή-ρωσης	Επιτρεπτές μεταβολές Min/max	Περίοδος μέτρησης	Σημειώσεις
Συχνότητα	50 Hz	10 sec	-1%/+1% @ 99.5% για ορίζο-ντα ενός έτους -6%/+4% @ 100% για ορίζο-ντα ενός έτους	1 βδομά-δα	
	50 Hz	10 sec	-2%/+2% @ 99.5% ενός έτους -15%/+15% @ 100% ενός έτους	1 βδομά-δα	Για αυτόνομα συστήματα
Μεταβολή πλάτους τάσης	230 V	10 min	-10%/+10% @ 95% μιας βδο-μάδας -15%/+10% @ 100% μιας βδομάδας	1 βδομά-δα	
Γρήγορες με-ταβολές τάσης	230V		Γενικά -+5% Μέγιστο -+10% για αρκετές φορές την ημέρα	1 ημέρα	Ενδεικτικά
Flicker			Plt<1 @ 95% μιας εβδομάδας	1 εβδομά-δα	
Βυθίσματα τάσης			10-1000/έτος, <1 sec, βάθους< 60% προκαλούμενες από μεγάλα φορτία	1 έτος	Ενδεικτικά βάθος % της κανονικής τιμής της Uc
Διακοπές μι-κρής διάρκειας			10 έως αρκετές εκατοντάδες, 70%<1 sec.	1 έτος	Ενδεικτικά, διάρκεια<3 min
Διακοπές με-γάλης διάρ-κειας			10-50	1 έτος	Εκτός τις ανα-κοινω-θήσες εκ των προτέρων
Προσωρινές υπερτάσεις			<1,5KV rms μέχρι 5 sec <2*Uc, αστοχίες <3*Uc, ferrroresonance		Ενδεικτικά
Μεταβατικές υπερτάσεις			<6 KV		Ενδεικτικά
Ασυμμετρία τάσης		10 min	<2% @ 95% μιας εβδομάδας, περιστασιακά μέχρι 3%	1 εβδομά-δα	
Αρμονικές		10 min	Πίνακας 2 @ 95% μιας εβδο-μάδας	1 εβδομά-δα	
Ενδο-αρμονικές		10 min	Όρια υπό διαμόρφωση	1 εβδομά-δα	
Σήματα ελέγ-χου		3 sec	Μικρότερα από το γράφημα 1 @99% μιας μέρας	1 ημέρα	

Πίνακας 5.1 **– Προδιαγραφές κατά EN50160 για δίκτυα χαμηλής τάσης**

Odd harmonics				Even harmonics	
Non -multiple of 3		Multiple of 3			
Harmonic Order h	Harmonic Voltage %	Harmonic Order h	Harmonic Voltage %	Harm onic Order h	Harmonic Voltage %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
$17 \leq h \leq 49$	2,27x(17/h) – 0,27	$21 < h \leq 45$	0,2	$10 \leq h \leq 50$	0,25 x (10/h) + 0,25

Πίνακας 5.2 **- Όρια του πλάτους της τάσης των αρμονικών για δίκτυα χαμηλής τάσης σύμφωνα με τη προδιαγραφή IEC**

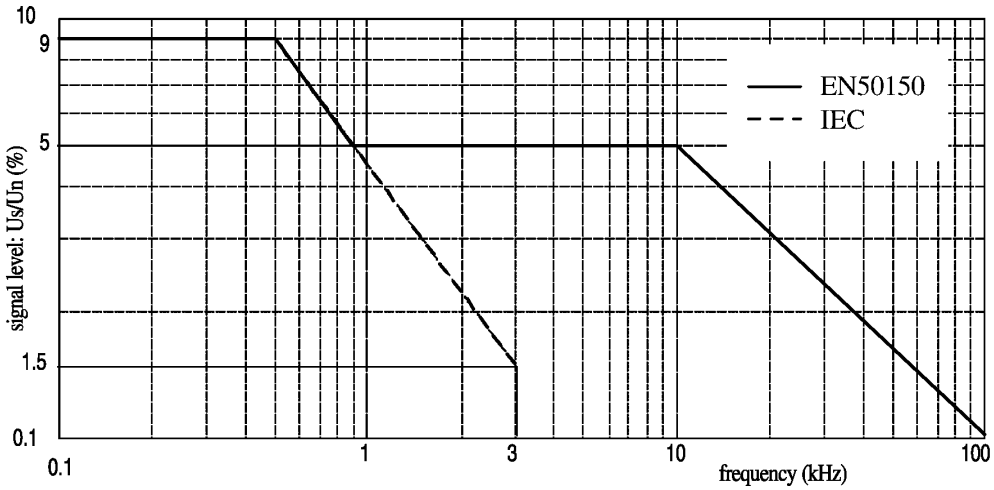
Odd harmonics				Even harmonics	
Non -multiple of 3		Multiple of 3			
Harmonic Order h	Harmonic Voltage %	Harmonic Order h	Harmonic Voltage %	Harmonic Order h	Harmonic Voltage %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6..24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				
NOTE – No values are given for harmonics of order higher than 25, as they are usually small but largely unpredictable due to resonance effects.					

Πίνακας 5.3 **- Όρια πλάτους τάσης αρμονικών (ως ποσοστά % την ονομαστικής τάσης) σύμφωνα με την προδιαγραφή EN50160**

Table 3.2 Limits of Harmonic Distortion[21] (CSA Standard C22.2, No. 107.1-01)

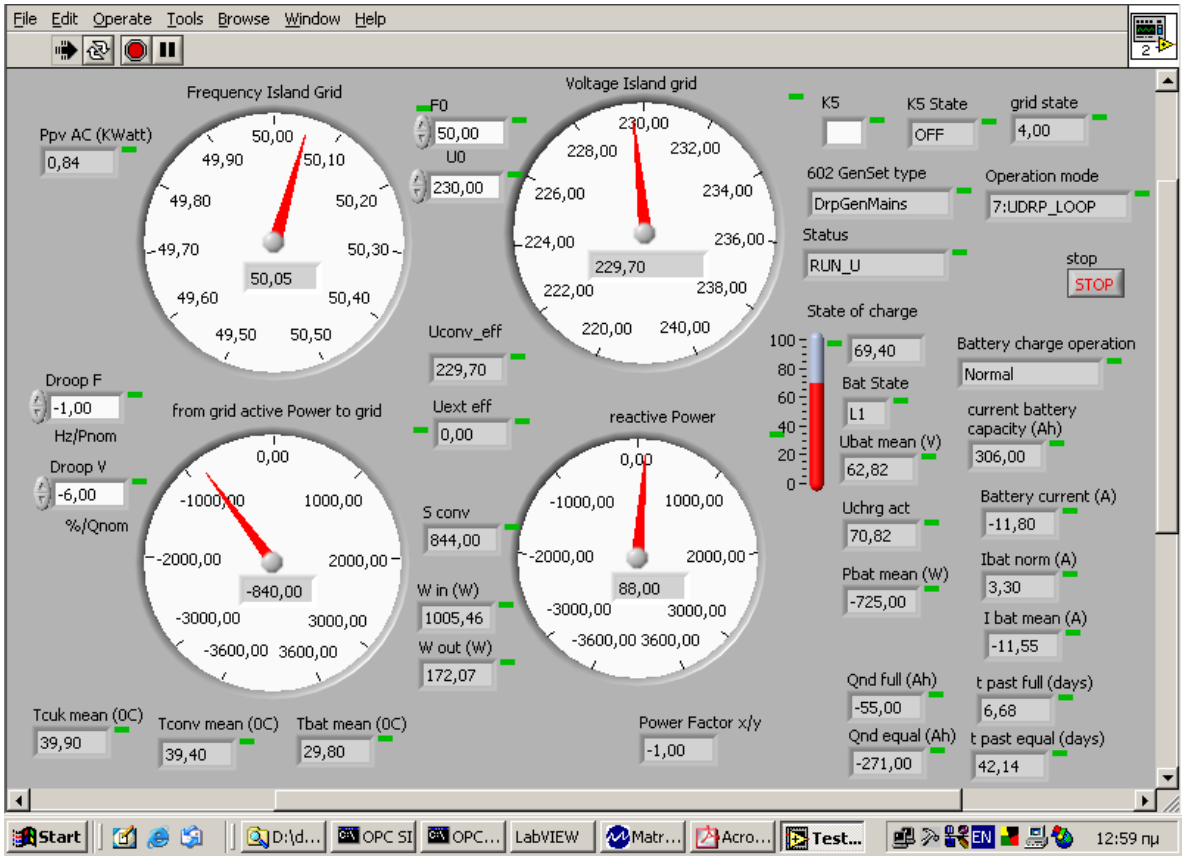
	Maximum distortion	
Harmonic numbers	**Even harmonics**	**Odd harmonics**
2nd through 9th	1.0%	4.0%
10th through 15th	0.5%	2.0%
16th through 21st	0.4%	1.5%
22nd through 33rd	0.2%	0.6%
Above the 33rd	0.1%	0.3%

Πίνακας 5.4 - **Πρότυπα αρμονικών κατά την καναδική προδιαγραφή C22.2, No. 107.1-01**



Όρια πλάτους σημάτων ελέγχου σύμφωνα με τις προδιαγραφές IEC και EN50160

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – Λογισμικό ελέγχου και μετρήσεων labview



Με το πρόγραμμα labview, αφού γίνει η απαραίτητη σύνδεση μέσω του προγράμματος matrikon OPC server, δίνεται η δυνατότητα ταυτόχρονης προβολής των στοιχείων των δύο αντιστροφέων καθώς και ρύθμισης αυτών. Διακρίνονται τα όργανα προβολής της τάσης, της συχνότητας, της ενεργού και άεργου ισχύος του αντιστροφέα. Οι κλίσεις στατισμού καθώς και η ονομαστική τάση και συχνότητα του αντιστροφέα.

Επίσης μετράται ταυτόχρονα: η ισχύς εξόδου των φωτοβολταϊκών, το ρεύμα των συσσωρευτών, ο συντελεστής ισχύος εξόδου του sunny island, η φαινόμενη ισχύς Sconv, η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών, η χωρητικότητά τους, όπως υπολογίζεται από τον αντιστροφέα, ο χρόνος από την τελευταία πλήρη και εξισωτική φόρτιση, οι θερμοκρασίες στον DC/DC μετατροπέα και στον DC/AC αντιστροφέα του sunny island, το είδος της διασύνδεσης με τις εξωτερικές πηγές τάσης, το είδος του ελέγχου της τάσης (UDRP_LOOP), η παρούσα λειτουργία του αντιστροφέα (RUN_U), και η κατάσταση του διακόπτη K5.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, Μ. Παπαδόπουλου, Καθηγητή ΕΜΠ, Αθήνα 1997
2. Φωτοβολταϊκή τεχνολογία, Κ. Καγκαράκη, καθηγητή ΕΜΠ, εκδόσεις Συμμετρία, 1992
3. Ηλεκτρονικά Ισχύος Ι, Σ. Μανιά, καθηγητή ΕΜΠ, Αθήνα 2000
4. Ηλεκτρονικά Ισχύος, Mohan –Underland –Robbins, β΄ έκδοση, ελλ. έκδοση: εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1996
5. Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, Μ. Παπαδόπουλου, καθηγητή ΕΜΠ, Αθήνα 1994
6. Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος Ι, Β. Παπαδιά, καθηγητή ΕΜΠ, Αθήνα 1985
7. Wind and Solar Power Systems, M.R. Patel, CRC Press, 1999
8. Εφαρμοσμένη Ηλεκτροχημεία, Θ. Σκουλικίδη, Καθηγητή ΕΜΠ, Αθήνα 1979
9. Manuals της εταιρίας SMA για τις συσκευές: Sunny boy 1100E, Sunny boy control, Sunny data display, Sunny Island
10. Operation of a prototype Micro-grid system based on micro-sources equipped with fast-acting power electronics interfaces, S. Papathanassiou, Microgrids project, NTUA
11. The CERTS MicroGrid Concept, Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, California, April 2002
12. Management of MicroGrids, Pecas Lopez, Porto, October 2003
13. CIGRE technical brochure on modeling new forms of generation and storage, November 2000
14. Control of Power electronic Interfaces in Distributed Generation Microgrids, A. Arulampalam, 2003
15. Study case, LV network, Microgrids project, Stavros Papathanassiou, NTUA
16. Effect of renewable energy sources on power quality – recent research activities, T. Degner, C. Bendel, A. Engler, M. Viotto, C. Metzger, CIRED, 17th International Conference on Electricity distribution, May 2003
17. Ενέργεια, Περιβάλλον και επιχειρηματικότητα, Σ. Ψωμάς, Εθνικό κέντρο περιβάλλοντος και αειφόρου ανάπτυξης, Νοέμβριος 2003
18. Εθνική έκθεση για το επίπεδο διείσδυσης της ανανεώσιμης ενέργειας το έτος 2010 (Άρθρο 3 οδηγίας 2001/77/ΕΕ)
19. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Ρυθμιστική αρχή ενέργειας, επικαιροποιημένη έκθεση Μαΐου 2002
20. Κλιματική Αλλαγή, Εθνικό πρόγραμμα μείωσης εκπομπών αερίων φαινομένου θερμοκηπίου (2000-2010), ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα, Μάρτιος 2002
21. Παρατηρήσεις, συγκρίσεις, επισημάνσεις και σχόλια επί του *«Σχεδίου μακροχρόνιου ενεργειακού σχεδιασμού της Ελλάδας»* που εκπονήθηκε από τη ΡΑΕ, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών
22. Ο Γερμανικός νόμος EEG/REL, Ενημερωτικό δελτίο ΤΕΕ, τεύχος 2121, Οκτώβριος 2000
23. Lead- Acid battery guide for stand alone photovoltaic systems, IEA-PVPS, Task 3, Report 6, December 1999
24. Recommended practices for charge controllers, IEA-PVPS, Task 3, Report 5, August 1998
25. Reliability study of grid-connected PV systems. Field experience and recommended design practice. IEA PVPS, Task 7, Report 8, March 2002

26. Photovoltaics 2000. The markets, the players and forecasts, Sarasin basic report, Basel, September 2000
27. PV Payback, Karl Knapp and Theresa Jester, Homepower magazine, issue 80, December 2000- January 2001
28. Solar tracker basics, R. Perez, Homepower # 101, June-July 2004
29. Batteries and charge control in stand-alone photovoltaic systems. Fundamentals and applications, James Dunlop, Sandia National Laboratories, Florida 1997
30. Key world energy statistics 2003, International Energy Agency, 2003
31. World Energy Outllook 2000, International Energy Agency
32. Probability of islanding in utility networks due to grid connected photovoltaic power systems, IEA-PVPS, Task 5, Report 7, September 2002
33. Implementation and testing of anti-islanding algorithms for IEEE 929 –2000 compliance of single phase photovoltaic inverters
34. EMC and safety Design for photovoltaic systems, ESDEPS, March 2002, Kassel
35. Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility-Interactive Inverters in Photovoltaic Systems, Ward Bower and Michael Ropp, Sandia National Laboratories, November 2002
36. Wind and Solar Power Systems, M.R. Patel, 1999
37. From space to earth: the story of solar electricity, John Perlin, 2002
38. Handbook of Batteries, David Linden, 1995
39. Power Harmonics Analyzer and Power Quality Analyzer, Modern Power Quality Measurements Techniques (Metrel), Northern Desing Ltd., 2001

Για την συγγραφή της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν και πολλές πληροφορίες από το διαδίκτυο. Συνοψίζονται ορισμένοι δικτυακοί τόποι απ' τους οποίους αντλήθηκαν πληροφορίες καθώς και άλλοι σχετικοί με το θέμα της εργασίας.

1. **microgrids.power.ece.ntua.gr**
2. www.sma.de
3. www.rae.gr
4. www.desmie.gr
5. www.ypan.gr
6. www.pvportal.com
7. www.iea-pvps.org
8. www.oja-services.nl/iea-pvps
9. www.iea.org
10. www.solarserver.de
11. www.climate.noa.gr
12. www.worldbank.org/astae/quappv
13. www.homepower.com
14. www.sandia.gov/PV
15. www.jxj.com/magsandj/rew/index.html
16. www.pvresources.com
17. www.pvportal.com
18. www.cres.gr
19. www.helapco.gr
20. www.hellasres.gr
21. www.greenpeace.gr
22. www.batteryfaq.org